

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт
«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
Г. Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия
«___» _____ 20 ____ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

Анализ возможности распределения компенсирующих устройств в тяговой сети
участка Камышта – Бискамба Красноярской железной дороги
тема

Руководитель	_____	<u>доцент каф.ЭЭ, к.т.н.</u>	<u>А.В.Коловский</u>
	подпись, дата	должность, научная степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>С.В.Степанов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>И.А.Кычакова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Анализ возможностей распределения компенсирующих устройств в тяговой сети участка Камышта – Бискамжа Красноярской железной дороги» содержит 78 страниц текстового документа, 56 рисунков, 11 таблиц, 25 использованных источников, 3 листа графического материала.

ТЯГОВАЯ СЕТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ, КОНТАКТНАЯ СЕТЬ, ОТСАСЫВАЮЩАЯ ЛИНИЯ, НЕЙТРАЛЬНАЯ ВСТАВКА, ПОСТ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ, ПРОДОЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ, ПОПЕРЕЧНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ.

Объект исследований – компенсирующие устройства в тяговой сети участка Камышта – Бискамжа Красноярской железной дороги.

Предмет исследований – место расположение различных компенсирующих устройств в тяговой сети.

Метод исследования – графическое моделирование в системе MATLAB, при помощи пакета Simulink.

Научная новизна – использование графических методов моделирования в оценке параметров качества электрической энергии.

Цель работы – анализ оптимального месторасположения различных компенсирующих устройств в контактных сетях.

Значимость работы обусловлена тем, что теоретические и практические рекомендации проведенного анализа имеют место в модернизации контактных сетей.

Область применения – работа может быть предложена как рекомендации к модернизации технического оборудования в контактных сетях.

Задачи выпускной квалификационной работы:

- провести подробный анализ местоположения различных компенсирующих устройств, путем графического моделирования в системе MATLAB, при помощи пакета Simulink.

В течении проработки проекта были получены следующие результаты:

- была составлена модель различных компенсирующих устройств контактной сети.

- выполнен анализ и выбрано наиболее действующее компенсирующее устройство.

ABSTRACT

Final qualifying work on «Analysis of possibilities of distributing compensating in traction network of Kamyshta – Biskamzha section of the Krasnoyarsk railway» contains 78 text documents pages, 56 drawings, 11 tables, 25 sources, 3 sheets graphic materials.

TRACTION NETWORK POWER SUPPLY, SURGERY SUBSTATION, CONTACT NETWORK, SUCTION LINE, NEUTRAL INSERT, POST OF SECTIONING, LONGITUDINAL COMPENSATION, TRANSVERSE PAYMENT.

The object of research – compensating devices in traction network of Kamyshta – Biskamzha section of the Krasnoyarsk railway.

Research subject – the occupation of different compensating devices.

Research methods – graphic modelling in MATLAB system on the data Simulink.

Scientific novelty – the use of graphic methods of modelling marks of the parameters quality of electric energy.

The purpose of work is to analyze the optimum location of different compensating devices in the contact network.

The significance of work - theoretical and practical recommendation would be use in modernization of the contact network.

Scope - work can be offered as recommendations of modernization and development of technical measures in the contact networks.

Tasks of final qualifying work:

- perform the analysis of the locations of the different compensating devices graphical modelling in MATLAB system on the data Simulink.

During the study of the project were as follows:

- there was maid graphical model of the different compensating devices in the contact network in the system MATLAB perfectly;
- the analysis was performed and the most effective compensating device was selected.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Особенности электроснабжения железнодорожного транспорта.....	7
1.1 Основные понятия в железнодорожном электроснабжении	7
1.2 Работа тяговой сети переменного тока	9
2 Варианты установки компенсирующих устройств на исследуемом участке железной дороги.....	12
2.1 Варианты установки поперечной компенсации в контактных сетях	13
2.2 Варианты установки продольной компенсации в контактных сетях	18
3 Составление реальной математической модели контактных электрических сетей железной дороги в системе MATLAB при помощи пакета Simulink для анализа места установки компенсирующих устройств.....	25
3.1 Расчет параметров элементов компенсирующих устройств математической модели тяговой сети.....	26
3.2 Расчет параметров элементов фильтрокомпенсирующих устройств математической модели тяговой сети.....	30
3.3 Этапы создания графической модели тяговой сети	35
4 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при разных местах установки различных компенсирующих устройств	39
4.1 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке продольной компенсации на ТП	39
4.2 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке продольной компенсации на посту секционирования	45
4.3 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке поперечной компенсации на ТП	50
4.4 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке поперечной компенсации на посту секционирования	55

4.5 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке ФКУ на ТП Бискамжа и посту секционирования	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	68
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Однолинейная схема тяговой подстанции Камышта	71
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Однолинейная схема тяговой подстанции Югачи	72
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Однолинейная схема тяговой подстанции Бискамжа.....	73
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Алгоритм расчета параметров линий контактной сети, представленный в М-файле системы MATLAB	74

ВВЕДЕНИЕ

Качество электроэнергии в тяговой сети является одним из главных показателей надежности железной дороги. В настоящее время железная дорога имеет неудовлетворительное качество напряжения. Это обусловлено тем, что тяговые потребители имеют нелинейный характер нагрузки, различные режимы работы, высокую мощность электроприемника. Так же тяговая сеть довольно протяженная и имеет несимметричную нагрузку.

Контактная сеть – одна из основных единиц тяговых электрических сетей. Она имеет большую протяженность, что, совместно с высокой установочной электрической мощностью тягового состава, приводит к значительным потерям напряжения в сети. В связи с этим, становится актуальной проблема поддержания напряжения на требуемом уровне.

Целью выпускной квалификационной бакалаврской работы является анализ различных видов компенсирующих устройств и мест их установки. Для достижения поставленной цели, была выявлена основная задача, которая выполнена в выпускной работе: подробный анализ возможных компенсирующих устройств и мест их установки на исследуемом участке. Для эффективного достижения поставленной задачи, целесообразно будет выполнить моделирование системы тягового электроснабжения в системе MATLAB, при помощи пакета Simulink и его библиотеки элементов SimPowerSistems.

1 Особенности электроснабжения железнодорожного транспорта

1.1 Основные понятия в железнодорожном электроснабжении

Большая социальная и экономическая значимость является определяющим фактором в электрификации железнодорожного транспорта. Если не будет электроснабжения, то железнодорожный транспорт не сможет функционировать. Электрификация железных дорог начинается с 1895 года и развивается по сей день [1].

Тяговой сетью электроснабжения является сложная электрическая сеть, состоящая из тяговых подстанций, питающих линий, контактных сетей, рельсовых сетей и отсасывающих линий. Её сложность объясняется тем, что сеть содержит контуры, образованные рельсовой сетью, землей и дополнительными проводами. Ток, который протекает от тяговой подстанции к электроподвижному составу (ЭПС), распределяется между проводами контактной сети. Возврат тока на подстанцию происходит через рельсовую сеть, землю и далее по отсасывающей линии. Под действием взаимной индукции, проявляющейся между контурами сети, при протекании переменного тока, в цепи рельсовая сеть – земля индуцируется ток, направленный противоположно первоначальному току в контактной сети.

Тяговая подстанция (ТП) – это электрическая подстанция, предназначенная для питания транспортных средств на электротяге через контактную сеть, так же она является источником питания других потребителей [2].

Контактная сеть (КС) – это комплекс устройств, предназначенный для передачи электроэнергии от тяговых подстанций к ЭПС через токоприемники. В сети переменного тока для электрифицированного транспорта служит фазой тяговой сети, другой фазой служит рельсовая сеть. Контактная сеть может быть выполнена с контактным рельсом или с контактной подвеской.

Контактная сеть функционирует на открытом воздухе и поэтому подвержена воздействию климатических факторов. Еще одним неблагоприятным фактором для КС являются тепловые процессы. Они возникают при протекании тягового тока по элементам сети. Так же влияние оказывают механические воздействия со стороны токоприемников, а также электрокоррозионные процессы, многочисленные циклические механические нагрузки, износ оборудования сети и др. По этой причине контактная сеть должна обеспечивать высокое качество функционирования и токосъема в любых условиях эксплуатации. Одной важной особенностью использования контактной сети является ее 1-я категория надежности. Это объясняется тем, что сеть не имеет резерва. По этой самой причине, к КС предъявляют повышенные требования по надежности, с учетом которых осуществляется проектирование, строительство и монтаж, техническое обслуживание и ремонт.

Тяговая рельсовая сеть – это часть тяговой сети железной дороги, представляющая систему рельсов железнодорожного пути, используемых для протекания тяговых токов [3].

Отсасывающая линия тяговой сети — линия электропередачи, соединяющая заземленную фазу или заземленный полюс тяговой подстанции железной дороги, автотрансформаторного пункта, пункта преобразования напряжения с тяговой рельсовой сетью железной дороги.

Принцип работы тяговой сети с двухсторонним питанием представлен на рисунке 1.1. Система тягового электроснабжения получает питание от системы внешнего электроснабжения (СВЭ): двух электростанций — тепловой (ТЭС) и атомной (АЭС), районных подстанций (РП) и двух линий электропередачи ЛЭП-110 и ЛЭП-500 кВ. Далее питание поступает на тяговую подстанцию (ТП), которая подает ток для питания электроподвижного состава (ЭПС) по питающим линиям (ПЛ) и контактной сети (КС); ток на подстанцию возвращается по тяговому рельсу и отсасывающей линии (ОЛ). Для разделения двух участков контактной сети служит нейтральная вставка (НВ), напряжение на ней отсутствует и ЭПС проходит ее по инерции [4].

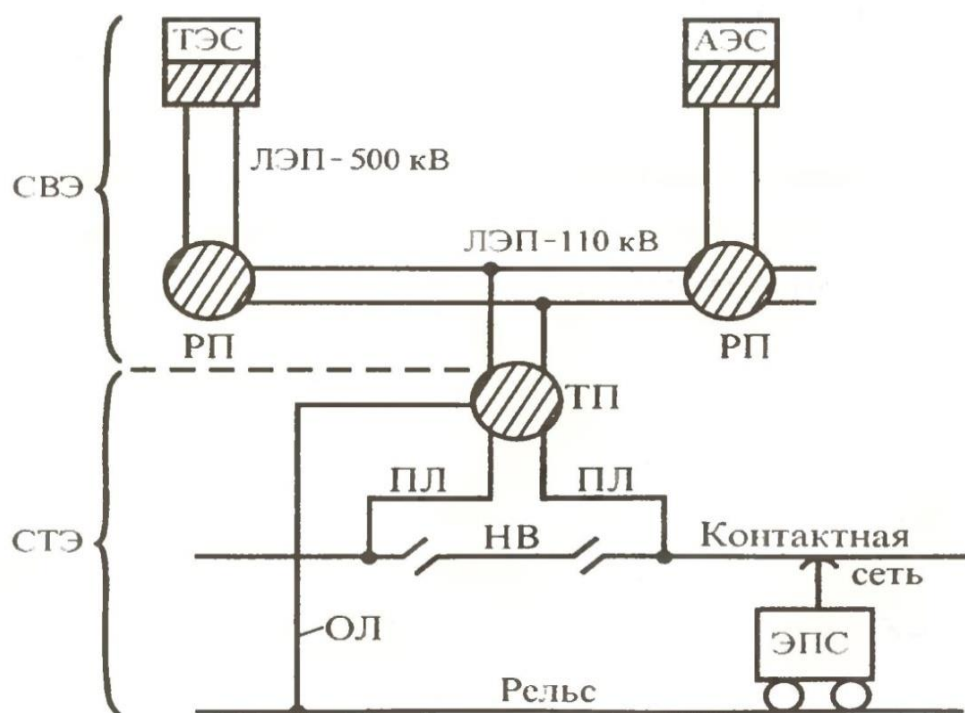


Рисунок 1.1 – Система тягового электроснабжения

Нейтральной вставкой (НВ) является устройство контактной сети, предназначенное для разделения фаз А и Б (секционирования КС) станции и перегона в сетях постоянного 3,3 кВ и переменного 27,5 кВ тока.

1.2 Работа тяговой сети переменного тока

Рассмотрим тяговую сеть переменного однофазного тока частотой 50 Гц напряжением 25кВ (Рисунок 1.2). Исследуемым участком железной дороги является участок Камышта – Югачи.

Данный участок (Рисунок 1.2) является линией с двухсторонним питанием. ТП питаются от ЛЭП 220кВ. Трехобмоточные трансформаторы понижают напряжение для двух видов потребителей: тяговых потребителей и нетяговых потребителей (НТ). Тяговый потребитель – ЭПС питается от пониженного до 27,5кВ напряжения (шины А, В, С). Нетяговые потребители питаются от пониженного напряжения, равного 35кВ.

Для равномерной загрузки фаз внешнего электроснабжения, в тяговую сеть напряжение от ТП передается от разных фаз трансформатора. Через выключатель Q1 контактная сеть, предназначенная для перегона слева от ТП1, питается от фазы В. Тяговый рельс на подстанции заземляется подключением к фазе С. Через выключатель Q2 контактная сеть запитана от шин фазы В ТП1. Перегон, ведущий к ТП2, запитывается через выключатель Q3 фазы А.

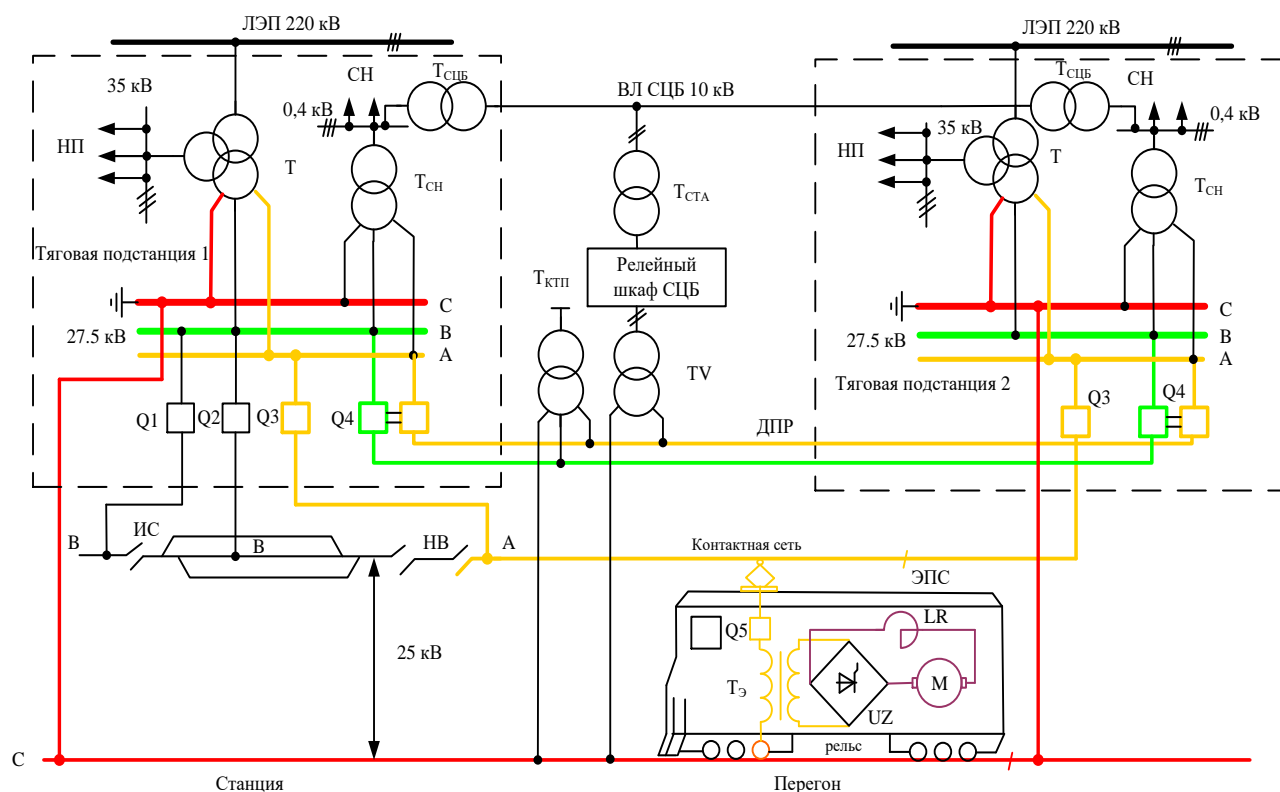


Рисунок 1.2 – Система тягового электроснабжения на переменном однофазном токе частотой 50 Гц напряжением 25кВ

Для разграничения фаз А и В на участке контактной сети, используют нейтральные вставки и изолирующие сопряжения. Нейтральная вставка отделяет фазу В и фазу А в начале перегона от ТП1 к ТП2. Изолирующее сопряжение устанавливается после перегона, ведущего к ТП1. Назначение ИС – это переход токоприемников ЭПС с фазы В ТП1 на фазу А перегона, ведущего к ТП2. Изолирующие сопряжения нейтральной вставки перекрываются токоприемником поочередно.

К шинам 27,5кВ подключается трансформатор собственных нужд T_{CH} ТП1. От шин среднего напряжения, через трансформатор $T_{СЦБ}$, напряжением 10кВ, передается в высоковольтную линию сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).

Нетяговые потребители запитываются от шин 27,5кВ, через систему ДПР (два провода – рельс). Питание осуществляется по двум проводам фаз А и Б, через выключатель Q4, третьим проводом является рельс. Трансформаторы $T_{КТП}$ понижают напряжение в системе ДПР до величины, необходимой потребителю. Резерв питания СЦБ осуществляется через трансформаторы TV, подключенные к одному из проводов линии ДПР и рельсу.

В системе тягового электроснабжения переменного тока существует несколько недостатков, связанных с электромагнитным влиянием сопротивлений системы. Вторым недостатком является несимметрия токовой нагрузки. Несимметрия связана с тем, что сама контактная сеть является трехфазной, в то время когда нагрузка сети в виде электродвижущегося состава – однофазна. Следующей проблемой является опасность возникновения процесса лавинного напряжения.

Влияние всех вышеперечисленных недостатков можно компенсировать введением в сеть компенсирующих устройств реактивной мощности.

2 Варианты установки компенсирующих устройств на исследуемом участке железной дороги

В тяговых сетях переменного тока компенсация реактивной мощности позволяет повысить энергетическую эффективность работы системы тягового электроснабжения, что приводит к повышению пропускной и провозной способности участка железной дороги [6].

Перечислим основные задачи, решаемые при компенсации реактивной мощности:

1. Снижение потерь электроэнергии в тяговой сети и в оборудовании тяговых подстанций;
2. Снижение уровня потребления реактивной мощности тяговыми подстанциями в режимах тяги и рекуперативного торможения;
3. Снижение потерь напряжения в тяговой сети и повышение пропускной и провозной способности участка железной дороги;
4. Снижение уровня несинусоидальности напряжения в тяговой сети.

Решение задач – это установка устройств компенсации реактивной мощности и применение фильтрокомпенсирующих устройств, с целью снижения уровня высших гармоник, т.е. несинусоидальности напряжения.

Особенность установки компенсирующих устройств в системе тягового электроснабжения – их однофазность или двухфазность, а так же наличие защитного реактора для ограничения явления резонанса на высоких частотах.

Фильтрокомпенсирующее устройство – устройство компенсации реактивной мощности, обладающее дополнительной функцией фильтрации высших гармонических составляющих тока железнодорожного электроподвижного состава.

2.1 Варианты установки поперечной компенсации в контактных сетях

Устройство поперечной компенсации реактивной мощности (ППК) – устройство компенсации реактивной мощности, включаемое параллельно нагрузке (Рисунок 2.1) [3].

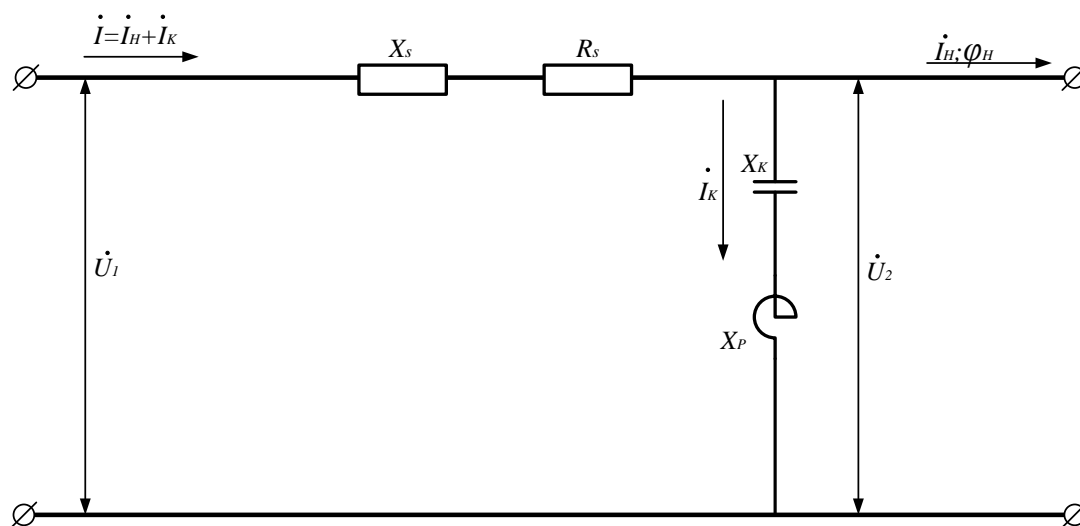


Рисунок 2.1 – Схема замещения участка тяговой сети при ППК

На рисунке 2.1 используются следующие обозначения:

где R_S – активное сопротивление системы (от источника питания до места установки ППК);

X_S – индуктивное сопротивление системы (от источника питания до места установки ППК);

X_K – емкостное сопротивление ППК;

X_P – индуктивное сопротивление реактора;

φ_H – угол сдвига между напряжением и током в начале линии без ППК;

U_1 – напряжение в начале (у источника питания) линии;

U_2 – напряжение в конце (в месте установки ППК) линии;

I_H – ток нагрузки;

I_K – ток на зажимах устройства ППК;

I – суммарный ток нагрузки и ППК

Увеличение потерь электроэнергии происходит за счет реактивного тока в обмотках устройств контактной сети. В связи с чем ППК обычно устанавливается либо на шинах подстанции, либо на постах секционирования. Последовательно с устройством ППК устанавливается реактор, с целью нарушения условия резонанса напряжения (2.1) [7].

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (2.1)$$

где ω_0 – угловая резонансная частота колебательного контура;

L – индуктивное сопротивление колебательного контура;

C – емкостное сопротивление колебательного контура.

Большую роль в продольной компенсации играет коэффициент мощности. В каждый момент времени он является разным и определяется по формуле (2.2).

$$\lambda = \frac{P_t}{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}, \quad (2.2)$$

где λ – коэффициент мощности в определенный момент времени;

P_t – активная мощность в момент времени;

Q_t – реактивная мощность в момент времени.

Коэффициент мощности в электровозах определяется в соответствии с формулой (2.3).

$$\lambda = \nu_1 \cos \varphi_1, \quad (2.3)$$

где λ – коэффициент мощности в определенный момент времени;

ν_1 – коэффициент искажения кривой тока;

φ_1 – угол сдвига фаз между первыми гармониками тока и напряжения.

На шинах ТП коэффициент мощности составляет 0,75 – 0,85. Чтобы повысить этот коэффициент на шинах подстанции и устанавливается поперечная компенсация. Чаще всего используют конденсаторные батареи. Отметим, что сопротивление каждой батареи не должно отличаться друг от друга не более чем на 3% [8]. Они включаются во вторичные обмотки трансформаторов подстанции (Рисунок 2.2).

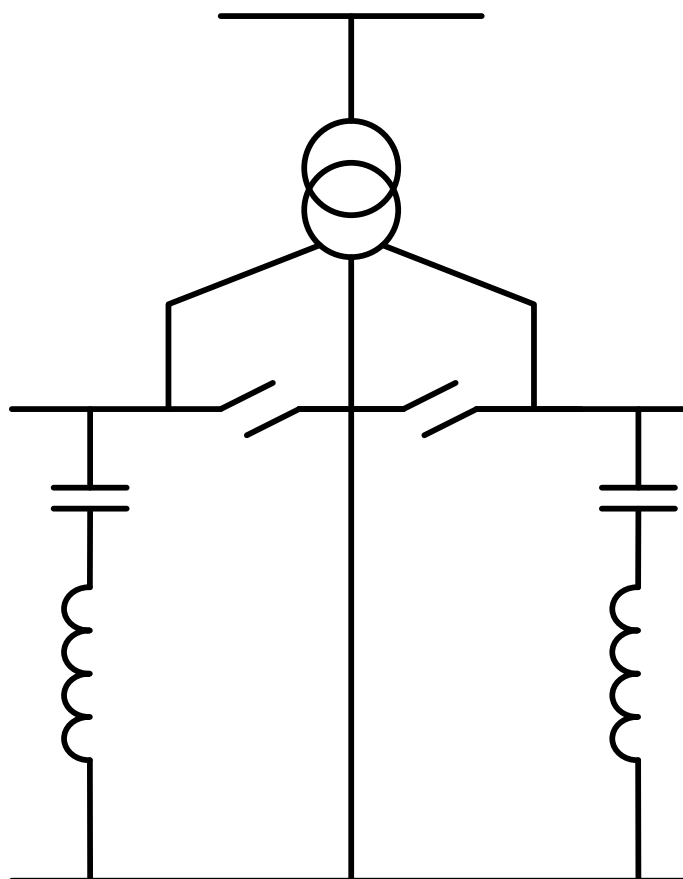


Рисунок 2.2 – Схема включения ППК на шины тяговой подстанции

Включение конденсаторной установки ППК на шинах тяговых подстанций 27,5 кВ создаст условия для возникновения резонанса напряжений. Тогда колебательный контур будет иметь две параллельных ветви: первая ветвь будет состоять из индуктивных сопротивлений системы и трансформаторов ТП, а вторая ветвь образуется из индуктивных сопротивлений тяговой сети и ЭПС.

В момент окончания коммутации вентилей ЭПС, происходит скачкообразное увеличение напряжения (оно происходит дважды за период). В

колебательном контуре возникает ток собственных колебаний. Этот ток имеет повышенную частоту и стремится к значению, соизмеряемому с основным током. Возникает резонанс напряжений. Он возникает при каждой нечетной гармонике в контактных сетях. По этой причине, в линию последовательно с устройством ППК устанавливается реактор.

В результате данного включения ППК происходит уменьшение потерь напряжения, и как следствие увеличение уровня напряжения в фидерной зоне. Так же происходит дополнительное уменьшение энергии.

Основной задачей устройства ППК является компенсация реактивной мощности, которую вырабатывает ЭПС. По этой самой причине ППК устанавливают на посты секционирования контактной сети, т.е. на пути следования электровоза (Рисунок 2.3).

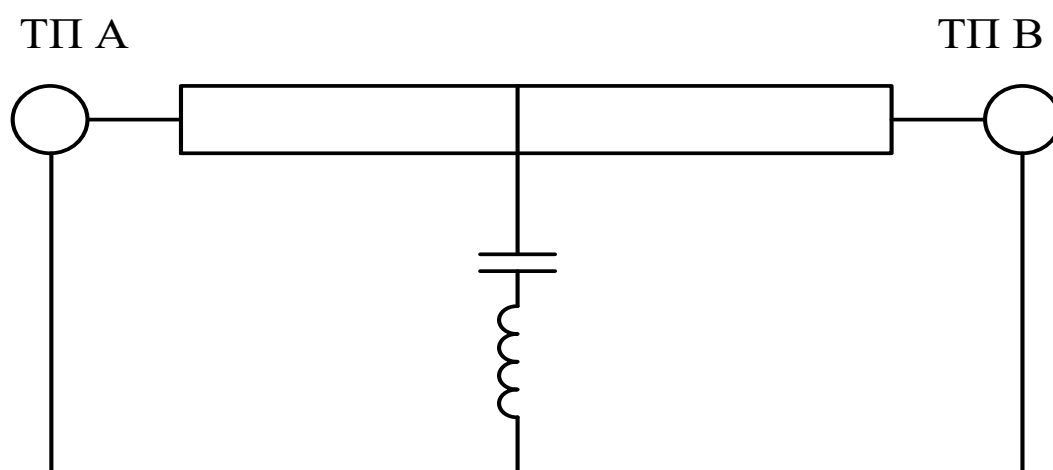


Рисунок 2.3 – Схема включения ППК на пост секционирования тяговой сети

В случае, когда поперечная компенсация располагается на посту секционирования, происходят дополнительные уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети электроснабжения, а так же происходит повышение напряжения в сети. При малой нагрузке в фидерной зоне, напряжение может выйти за допустимые пределы. Так же учитывается, что мощность ППК растет с увеличением напряжения. В случае большой нагрузки

происходит большое понижение напряжения в сети и эффект от ППК будет сильно убывать. В этих условиях целесообразно применять регулируемую установку ППК [7].

При установке ППК, должны выполняться следующие условия [6]:

1. Выбор фазы включения устройства поперечной компенсации реактивной мощности на шинах тяговой подстанции определяется необходимостью симметрирования тяговой нагрузки. Рекомендуется включать устройства поперечной компенсации реактивной мощности в отстающую фазу тяговой подстанции.

2. В случае, если нагрузка опережающей фазы значительно превосходит нагрузку отстающей фазы, необходимо рассмотреть вариант установки устройства поперечной компенсации реактивной мощности как в отстающую, так и опережающую фазы.

3. На участках железных дорог со значительными колебаниями тяговой нагрузки рекомендуется применять регулируемые устройства поперечной компенсации реактивной мощности, которые позволяют изменять потребляемую реактивную мощность ступенчато (одно- или многозвенные устройства) или плавно (статические тиристорные компенсаторы).

4. При необходимости снижения уровня высших гармоник (несинусоидальности) напряжения в тяговой сети в качестве устройств поперечной компенсации применяют фильтрокомпенсирующие устройства, располагаемые на посту секционирования или на тяговой подстанции.

Обратим внимание, что повышение напряжения в контактной сети тяговой сети электроснабжения при установке ППК не должно быть больше максимального допустимого значения, равного 29кВ. Если же при выборе мощности ППК на тяговой подстанции и при выполнении проверки по обеспечению поддержания минимального уровня напряжения на токоприемнике ЭПС, появляется необходимость повышения минимального уровня напряжения на токоприемнике ЭПС, то на ТП дополнительно размещают устройства поперечной компенсации реактивной мощности.

2.2 Варианты установки продольной компенсации в контактных сетях

Устройство продольной компенсации реактивной мощности (ПДК) – устройство компенсации реактивной мощности, включаемое последовательно с нагрузкой. По средствам данного устройства компенсации происходит уменьшение индуктивной составляющей сопротивления системы, а так же происходит улучшение коэффициента мощности. Данное улучшение происходит из-за уменьшения угла сдвига фаз между током и напряжением. Схема включения ПДК в контактную сеть представлена на рисунке 2.4.

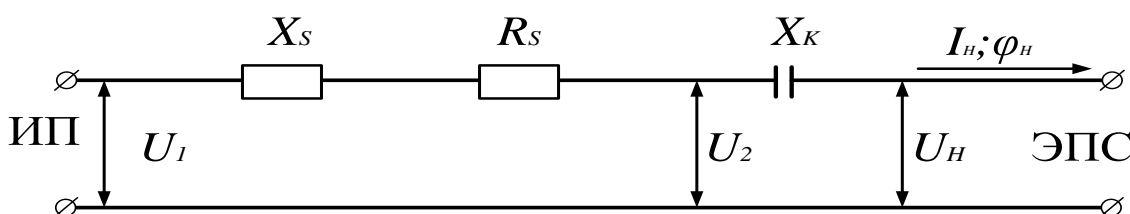


Рисунок 2.4 – Схема замещения участка тяговой сети при ПДК

На рисунке 2.4 используются следующие обозначения:

ИП – источник питания;

ЭПС – электроподвижной состав;

R_S – активное сопротивление системы (от источника питания до места установки ПДК);

X_S – индуктивное сопротивление системы (от источника питания до места установки ПДК);

X_K – емкостное сопротивление ПДК;

φ_H – угол сдвига фаз между напряжением и током в конце линии после ПДК;

U_1 – напряжение в начале (у источника питания) линии;

U_2 – напряжение в конце линии перед местом установки ПДК;

U_H – напряжение в конце линии после места установки ПДК;

I_H – ток нагрузки.

Продольная компенсация может располагаться в любом месте тяговой сети, на участке от источника питания до ЭПС. Каждый раз, в зависимости от расположения устройства продольной компенсации на участке, условия влияния и режимов работы установок ПДК будет различным на напряжение у тяговых потребителей. Возможные места установки компенсирующих устройств ПДК представлены на рисунке 2.5.

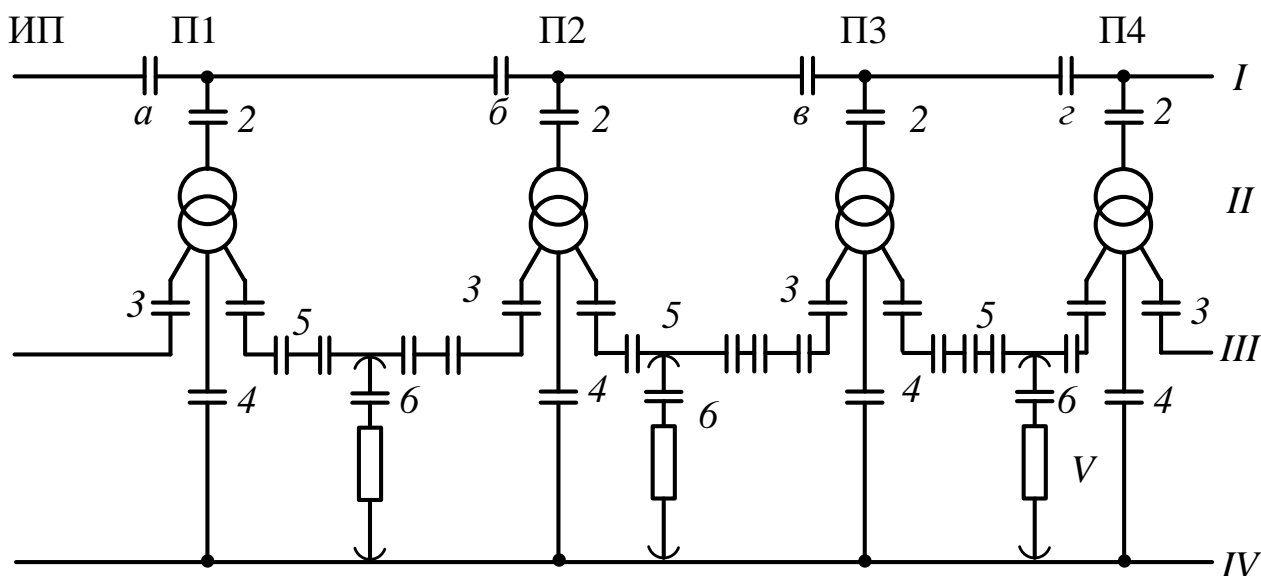


Рисунок 2.5 – Схема возможного расположения установок ПДК

На рисунке 2.5 используются следующие обозначения:

ИП – источник питания;

П – подстанция;

I – ЛЭП высокого напряжения;

II – тяговые подстанции;

III – контактная сеть;

IV – рельсы;

V – электровоз

Из-за последовательного соединения сопротивления ПДК с сопротивлением тяговой сети, перепады напряжения на них происходят пропорционально току протекания на участке, где установлена установка ПДК.

Существуют следующие свойства зависимости перепадов напряжения на участке от тока потребителей участка:

1. Если через устройство ПДК протекает ток только потребителя данного участка, где установлено ПДК, то скачок напряжения зависит только от самого тока потребителя участка.

2. Если через устройство ПДК протекают токи как от потребителя данного участка, где установлено ПДК, так и токи потребителей смежных участков, то перепады напряжения зависят от всех токов потребителей, влияющих на устройство ПДК.

Как следствие данных условий, напряжение на ПДК не должно превышать допустимого напряжения для оборудования, находящегося на участке. Т.е. компенсирующее устройство не должно быть с «запасом» по емкости, иначе напряжение на вводах оборудования может выйти за допустимые пределы.

Если устройства ПДК будут расположены в линии передачи высокого напряжения (точки а, б, в, г рисунка 2.5), то через точки установки компенсирующих устройств будут протекать суммарные токи всех подстанций на линии, а компенсация будет происходить только для потерь напряжения в линии ЛЭП до соответствующей ТП. К примеру, если установить устройство ПДК в точке в, то для тяговых подстанций ПЗ и П4 будут скомпенсированы потери в линии по всей длине от источника питания до подстанции после компенсирующего устройства, т.е. до подстанции ПЗ, от токов подстанций, которые располагаются после устройства ПДК, т.е. ПЗ и П4.

Если же устройства ПДК устанавливать на вводах ТП (точки 2 на рисунке 2.5), то скомпенсированы будут потери напряжения в линии от источника питания до самой подстанции от ее тока. Но при этом не будет возможности компенсации потерь напряжения в линии до подстанции от нагрузок других подстанций, а также потери до других подстанций от нагрузки данной подстанции. Если в данном случае выбирать емкостное сопротивление компенсирующего устройства с неким запасом, чтобы была возможность

скомпенсировать потери в линии от токовой нагрузки других подстанций, то возникает риск выхода уровня напряжения за допустимые значения. В случае подбора сопротивления, необходимо учитывать минимальное значение нагрузок от остальных подстанций.

Если устройство ПДК расположено в питающих фидерах контактной сети (точки 3, на рисунке 2.5), то возможна дополнительная компенсация потерь в трансформаторах тяговых подстанций. Потери в трансформаторах возникают за счет плеча подстанций, т.е. фидерной зоны.

Включение устройства ПДК в тяговую сеть зависит от типа трансформатора ТП. Если трансформатор является однофазным, то ПДК включают вместо питающего провода.

При условии, что однофазные трансформаторы установлены по схеме открытого треугольника, компенсирующее устройство ПДК включается на фидер. Данное включение направлено на компенсацию потерь в самом трансформаторе. Если в трансформаторе обмотки напряжения соединены по схеме «звезда-треугольник», то потери напряжения можно скомпенсировать только в самих обмотках трансформатора. Потери напряжения в обмотках трансформатора возникают из-за токов, протекающих в фидере, в котором включено устройство продольной компенсации. Потеря напряжения в смежных фидерных зонах скомпенсирована не будет. Такие зоны бывают положительными, запитка идет от отсасывающей линии (фазы), и отрицательными, когда питание идет от опережающей фазы.

Если компенсирующее устройство установить в отсасывающую линию (точки 4 на рисунке 2.5), то возникает возможность компенсации потерь напряжения в смежных фазах. Такая компенсация приведет к выравниванию уровней напряжения в фазах.

Если устанавливать распределенную продольную компенсацию вдоль контактной сети (точки 5 на рисунке 2.5), то компенсация реактивных потерь напряжения будет достигнута. Контактная сеть в месте установки ПДК секционируется, а секционное разъединение шунтируется самим устройством

ПДК. Если компенсирующие устройства равномерно распределить вдоль фидерной зоны контактной сети, то кривая напряжения будет стремиться из формы синусоиды к форме прямой линии, при условии увеличения числа устройств ПДК.

Когда электроподвижный состав проходит место установки устройства ПДК в контактной сети, то напряжение на ЭПС изменяется скачкообразно в прямой зависимости от емкостного сопротивления компенсирующего устройства, т.е. чем больше емкостное сопротивление, тем больше скачок напряжения на электровозе. По этой причине сопротивление компенсирующего устройства ограничена допустимым значением скачка напряжения на ЭПС. На двухпутных участках потери напряжения наводятся токами взаимоиндукции смежного пути контактной сети и эти потери компенсироваться не будут.

Если устройство ПДК установить на электроподвижном составе (точки 6 на рисунке 2.5), то будут скомпенсированы полностью все потери напряжения до ЭПС от тока самого электровоза. Но остальные потери, не связанные с током электродвижущегося состава компенсироваться не будут.

Электровоз является временной нагрузкой для участков контактной сети и не всегда находится в движении, то эффект от установленных на нем устройств ПДК будет минимальным. А так же установка устройств ПДК на электровозе весьма стеснит работу обслуживающего персонала электровоза из-за своей громозкости. А вес дополнительных установок находится в ограниченных рамках. Поэтому возможность данной установки весьма маловероятна.

Устройство ПДК обладает неоспоримым преимуществами. К ним относятся автоматичность и безынерционность действия по реактивным составляющим потерь напряжения. Такие свойства ПДК весьма выгодны в условиях эксплуатации тяговой сети, т.к. нагрузка на ней имеет резкий и непостоянный характер.

Компенсирующее устройство ПДК отрицательно влияет на кривую напряжения – возникает несинусоидальный характер токов, который вызывает потери напряжения, соответствующие каждой частоте высших гармоник.

Емкостное сопротивление обратнопропорционально частотам гармоник. Это объясняется тем, что чем выше гармоника по порядку, тем ниже сопротивление емкостной установки (в конденсаторе). Изменение емкостного сопротивления прямопропорционально изменению напряжения, вызванное гармониками тока. Другими словами, чем ниже сопротивление устройства ПДК, тем меньше потери напряжения в контактной сети.

Включение устройств ПДК в тяговую сеть приводит к уменьшению реактивного сопротивления системы для любой гармоники токовой нагрузки и следовательно для любой гармоники по напряжению. Чем меньше уменьшение, тем выше гармоника по частоте.

С увеличением тока, протекающего по устройству продольной компенсации, растет напряжение на установках ПДК. Поэтому возникает риск больших значений напряжения короткого замыкания. А применение устройства ПДК приводит к увеличению значения тока короткого замыкания. По этой причине, параллельно с устройством ПДК устанавливается разрядник.

Еще одним неудобством использования устройств ПДК является отрицательный эффект при параллельной работе подстанций. Объясняется этот эффект следующим образом. При значительном уменьшении реактивной составляющей сопротивления линий, когда несколько питающих тяговых подстанций работают параллельно, происходит увеличение уравнивающих токов в питающих линиях контактной сети тягового электроснабжения. И в некоторых случаях параллельная работа подстанций может стать нецелесообразной, т.к. уровень уравнивающих токов может быть весьма велик и недопустим в сети, где они возникают.

Продольная компенсация дает смещение сдвига фаз между током и напряжением участка контактной сети на уменьшение угла. Этот сдвиг влияет на коэффициенты мощности. Но когда коэффициент мощности потребителей

почти не зависит от напряжения, это уменьшение угла сдвига фаз будет незначительным. Еще меньше влияние будет при питании таких устройств, как нерегулируемые трансформаторы и асинхронные двигатели, у которых с увеличением напряжения растет расход реактивной энергии.

Если электроподвижной состав в своей системе питания имеет электронные преобразователи, то происходит обратный эффект. Когда происходит увеличение напряжения, связанное с уменьшением индуктивного сопротивления питающего ЭПС сети, то коэффициент мощности увеличивается. Другими словами происходит увеличение эффекта от использования установок продольной компенсации.

При установке устройств ПДК должны выполняться следующие условия, связанные с устройством понижающего трансформатора на ТП [6]:

Условие №1: Установка непереключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности целесообразна, если на расчетном участке железной дороги на тяговую нагрузку постоянно работает только один понижающий трансформатор;

Условие №2: Установка переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности с двухступенчатым регулированием целесообразна, если на тяговую нагрузку постоянно работают два понижающих трансформатора или же второй понижающий трансформатор работает только при кратковременном увеличении тяговой нагрузки. В этом случае постоянно в работу введена первая ступень, а вторую подключают при включении в работу второго понижающего трансформатора.

3 Составление реальной математической модели контактных электрических сетей железной дороги в системе MATLAB при помощи пакета Simulink для анализа места установки компенсирующих устройств

Для анализа возможности распределения компенсирующих устройств на участке тяговой сети, при помощи компьютерного моделирования в системе MATLAB, библиотеки SimPowerSistems пакета Simulink, была создана модель тяговой сети. За основу был взят участок тяговой сети: Камышта – Бискамжа Красноярской железной дороги. Причина выбора данного участка – его максимальная загруженность и как следствие, частые провалы по напряжению. Сильная загруженность участка обусловлена горным рельефом местности, через которую проходят железнодорожные пути. Данный участок, изображен на рисунке 3.1. Горный рельеф местности обуславливает работу ЭПС, как в двигательном, так и в рекуперативном режимах.

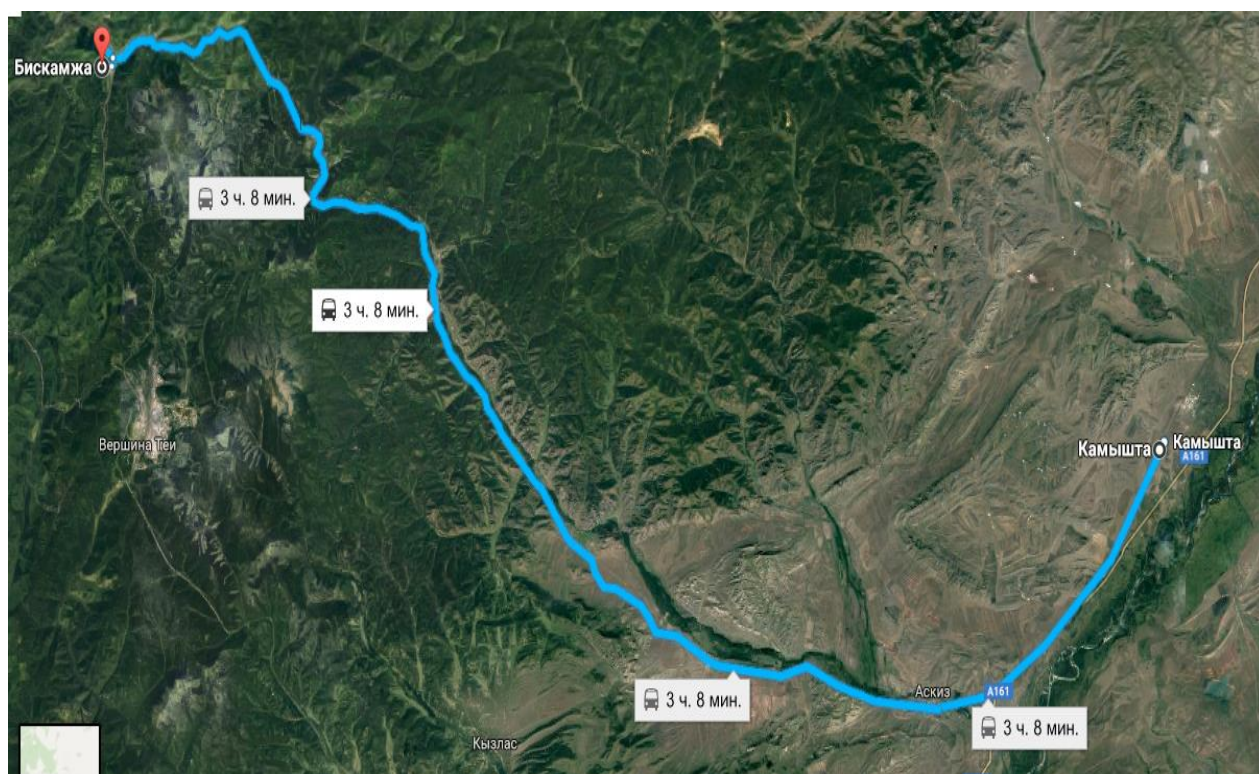


Рисунок 3.1 – Исследуемый участок Красноярской железной дороги Камышта – Бискамжа

На выбранном участке контактной сети, необходимо рассмотреть возможные места установки компенсирующих устройств и сравнить эффективность различных мероприятий по компенсации реактивной мощности.

Модель данного участка позволит оценить эффект при различных местах установки устройств компенсации реактивной мощности на железной дороге и определить наиболее эффективные месторасположения компенсирующих устройств.

Основными элементами модели графического моделирования тяговой сети являлись: тяговая подстанция, контактная сеть, электровоз в нормальном режиме, электровоз в рекуперативном режиме, система ДПР (два повода – рельс) и компенсирующие устройства.

Все элементы модели были составлены при помощи библиотеки SimPowerSystems пакета Simulink системы MATLAB.

3.1 Расчет параметров элементов компенсирующих устройств математической модели тяговой сети

Графической модели компенсирующего устройства соответствует математический расчет емкостного сопротивления [9]. Для каждого типа компенсирующего устройства производится отдельный расчет параметров.

Для устройства ППК производится расчет емкостного сопротивления, а также расчет сопротивлений токовых реакторов. Также рассчитаем значения емкости компенсирующей установки и индуктивность реактора. Расчет ведется в соответствии с формулами 3.1 – 3.4 [10]. Модели линии с поперечной компенсацией соответствует рисунок 3.2.

$$X_{\text{ППК}} = \frac{U^2}{Q_{\text{ППК}}}, (\text{Ом}) \quad (3.1)$$

где $X_{\text{ППК}}$ – емкостное сопротивление компенсирующей установки ППК (Ом);
 U – допустимый уровень напряжения в контактной сети $U = 29$ (кВ);
 $Q_{\text{ППК}}$ – реактивная мощность компенсирующей установки ППК $Q_K = 1$ (МВар).

$$X_P = 0,125X_{\text{ППК}}, (\text{Ом}) \quad (3.2)$$

где X_P – индуктивное сопротивление реактора (Ом);
 $X_{\text{ППК}}$ – емкостное сопротивление компенсирующей установки (Ом).

$$C = \frac{1}{\omega X_K}, (\Phi) \quad (3.3)$$

где C – емкость компенсирующего устройства (Ф);
 ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад/с);
 X_K – емкостное сопротивление компенсирующей установки (Ом).

$$L = \frac{X_P}{\omega}, (\text{Гн}) \quad (3.4)$$

где L – индуктивность реактора (Гн);
 ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад/с);
 X_P – индуктивное сопротивление реактора (Ом).

$$X_{\text{ППК}} = \frac{29^2}{1} = 841 (\text{Ом});$$

$$X_P = 0,125 \cdot 841 = 105,125 (\text{Ом});$$

$$C = \frac{1}{314 \cdot 841} = 3,79 (\Phi);$$

$$L = \frac{105,125}{314} = 0,335 (\text{Гн}).$$



Рисунок 3.2 – Модель устройства поперечной компенсации

Для устройства продольной компенсации производится расчет емкостного сопротивления с учетом индуктивного сопротивления контактной сети (3.5 – 3.8). Расчет сопротивлений контактной сети производится в М-файле (Приложение Г). Модели линии с продольной компенсацией соответствует рисунок 3.3.

$$X_{\text{ПДК}} = 0,5X_L, (\text{Ом}) \quad (3.5)$$

где $X_{\text{ПДК}}$ – емкостное сопротивление компенсирующей установки ПДК (Ом);
 X_L – индуктивное сопротивление линии контактной сети, в которую установлена установка ПДК (Ом).

$$X_L = \omega L (\text{Ом}) \quad (3.6)$$

где X_L – индуктивное сопротивление линии контактной сети, в которую установлена установка ПДК (Ом)

L – индуктивность линии контактной сети, в которую установлена установка ПДК (Гн);

ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад/с).

$$X_{\text{ПДК}} = 0,5\omega L(\text{Ом}) \quad (3.7)$$

где $X_{\text{ПДК}}$ – емкостное сопротивление компенсирующей установки ПДК (Ом);
 L – индуктивность линии контактной сети, в которую установлена установка ПДК (Гн);
 ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад/с).

$$C = \frac{1}{0,5\omega^2 L}, (\Phi) \quad (3.8)$$

где C – емкость компенсирующего устройства (Ф);
 ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад/с);
 L – индуктивность линии контактной сети, в которую установлена установка ПДК (Гн);

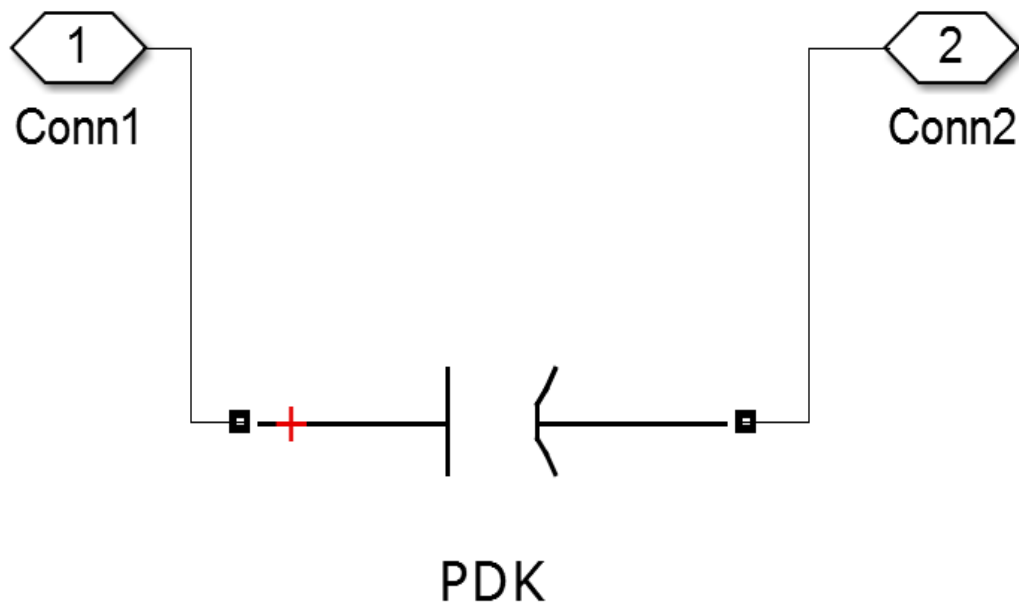


Рисунок 3.3 – Модель устройства продольной компенсации

3.2 Расчет параметров элементов фильтрокомпенсирующих устройств математической модели тяговой сети

Наличие компенсирующих устройств в контактной сети вызывает резонанс напряжений в сети 25 кВ. Синусоида напряжения искажается и появляется необходимость фильтрации высших гармоник в контактной сети.

Нечетные гармоники вызывают дополнительные потери в электрическом оборудовании контактной сети, приводят к чрезмерному износу изоляции оборудования и, как следствие, аварии. Компенсация реактивной мощности затрудняется, происходит нарушение работы счетчиков электрической энергии. Работа устройств автоматики и релейной защиты ухудшается вплоть до выхода из строя.

Исследование реальных устройств фильтрации экспериментальным образом весьма затруднительно, из-за сложной электротехнической системы устройства, трудоемкого анализа режимов и дорогим оборудованием в целом. Задачу упрощает компьютерное моделирование процессов фильтрокомпенсирующих устройств.

Основной задачей, при исследовании фильтрации высших гармоник, является имитация результатов, основанных на теоретическом анализе преобразовании энергии, которая протекает в устройстве фильтрокомпенсации высших гармоник. При этом делаются допущения, основанные на построении системы управления [11].

При эмитации режимов фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), в программе MATLAB были использованы следующие библиотеки среды Simulink: Math – библиотека математических функций, Sinks – модели виртуальных приборов для наблюдения и графического представления процессов, Electrical Source – моделируют источники электрической энергии, Library Power Elements – библиотека силовой техники, Power Electronics – библиотека силовых элементов и полупроводниковых преобразователей, Measurements – измерительная аппаратура и др [12].

При разработке графической модели ФКУ были поставлены следующие цели [13]:

1. Подтвердить основные теоретические положения, сделанные в процессе разработки системы управления устройством повышения качества электроэнергии;
2. Оценить качество фильтрации графика тока при различных негативных факторах со стороны нагрузки.

Тиристорный электропривод – источник нечетных гармоник [14]. Для борьбы высшими гармониками используются фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

Расчет ФКУ произведем согласно формулам 3.9 – 3.16. Расчет производится для каждой нечетной гармоники с третьей по пятнадцатую. Для высокочастотного спектра принимается широкополосный фильтр [15]. Модель ФКУ представлена на рисунке 3.4.

$$Q_K = U_{\Phi}^2 \omega C, (\text{МВар}) \quad (3.9)$$

где Q_K – реактивная мощность компенсирующей установки установленной на тяговой подстанции $Q_K = 1(\text{МВар})$;

U_{Φ} – фазное напряжения в контактной сети $U_{\Phi} = 27(\text{кВ})$;

ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 (\text{рад/с})$;

C – емкость ФКУ (Ф).

$$C = \frac{Q_K}{U_{\Phi}^2 \omega}, (\text{Ф}) \quad (3.10)$$

где C – емкость ФКУ (Ф).

Q_K – реактивная мощность компенсирующей установки установленной на тяговой подстанции $Q_K = 1(\text{МВар})$;

U_{Φ} – фазное напряжения в контактной сети $U_{\Phi} = 27(\text{кВ})$;

ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 (\text{рад/с})$;

C – емкость ФКУ (Ф).

В графической модели системы MATLAB, ФКУ устройство состоит из пяти ветвей. Каждая ветвь устройства фильтрации высших гармоник обладает одинаковой емкостью. Тогда емкость в каждой ветви будет определяться в соответствии с формулой 3.11.

$$C_{\text{вет}} = \frac{C}{N}, (\Phi) \quad (3.11)$$

где $C_{\text{вет}}$ – емкость ветви ФКУ (Φ);

C – емкость ФКУ (Φ);

N – количество ветвей в ФКУ, $N = 5$ (шт.).

Оптимальная добротность фильтрокомпенсирующего устройства лежит в пределах: $Q_d = 30 \div 60$. Принимаем добротность для модели ФКУ $Q_d = 45$.

С изменением номера высшей гармоники, активное сопротивление и индуктивность каждой ветви ФКУ изменяется, в соответствии с высшей гармоникой, на которую настроена ветвь ФКУ[16]. Изменяемые параметры определяются в соответствии с формулами 3.12 и 3.13.

$$R_{\vartheta} = \frac{1}{\vartheta \omega C_{\text{вет}} Q_d}, (\text{Ом}) \quad (3.12)$$

где R_{ϑ} – активное сопротивление ветви ФКУ (Ом);

Q_d – добротность ФКУ $Q_d = 45$;

$C_{\text{вет}}$ – емкость ветви ФКУ;

ϑ – номер гармоники;

ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад/с).

$$L_{\vartheta} = \frac{R_{\vartheta} Q_d}{\vartheta \omega}, (\text{Гн}) \quad (3.13)$$

где L_{ϑ} – индуктивность ветви ФКУ (Гн);

R_{ϑ} – активное сопротивление ветви ФКУ (Ом);

Q_d – добротность ФКУ $Q_d = 45$;

ω – угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад/с);

ϑ – номер гармоники.

Для широкополосного фильтра произведем расчет его резонансной частоты, в соответствии с формулой 3.14. Резонанс достигается при максимальной высшей гармонике, ее порядковый номер 11.

$$f_0 = \vartheta_{max} \cdot 50, (\text{Гц}) \quad (3.14)$$

где f_0 – резонансная частота широкополосного фильтра (Гц);

ϑ_{max} – номер максимальной гармоники $\vartheta_{max} = 11$.

Требуемый диапазон частот m лежит в интервале от 0,5 до 2. Принимаем $m = 1$. С учетом диапазона и резонансной частоты определяется сопротивление и индуктивность широкополосного фильтра, в соответствии с формулами 3.15 и 3.16.

$$R_{BЧ} = \frac{1}{2\pi f_0 C_{вет}}, (\text{Ом}) \quad (3.15)$$

где $R_{BЧ}$ – сопротивление широкополосного фильтра (Ом);

f_0 – резонансная частота широкополосного фильтра (Гц);

$C_{вет}$ – емкость ветви ФКУ.

$$L_{BЧ} = m \cdot R_{BЧ}^2 \cdot C_{вет}, (\text{Гн}) \quad (3.16)$$

где $L_{BЧ}$ – индуктивность широкополосного фильтра (Гн);

m – диапазон частот, $m = 1$;

$R_{BЧ}$ – сопротивление широкополосного фильтра (Ом);

$C_{вет}$ – емкость ветви ФКУ.

Произведем расчет для модели ФКУ, с учетом широкополосного фильтра. Для примера покажем расчет для первой ветви, оставшиеся результаты расчетов сведем в таблицу 3.1. Модель ФКУ представлена на рисунке 3.4.

$$C = \frac{1}{27^2 \cdot 314} = 4,37 \cdot 10^{-6} (\Phi);$$

$$C_{\text{вет}} = \frac{4,37 \cdot 10^{-6}}{5} = 8,74 \cdot 10^{-7} (\Phi);$$

$$R_3 = \frac{1}{3 \cdot 314 \cdot 8,74 \cdot 10^{-7} \cdot 45} = 27 (\text{Ом});$$

$$L_3 = \frac{27 \cdot 45}{3 \cdot 314} = 1,29 (\text{Гн});$$

$$f_0 = 11 \cdot 50 = 550 (\text{Гц});$$

$$R_{\text{ВЧ}} = \frac{1}{2\pi \cdot 550 \cdot 8,74 \cdot 10^{-7}} = 331,36 (\text{Ом});$$

$$L_{\text{ВЧ}} = 1 \cdot 331,36^2 \cdot 8,74 \cdot 10^{-7} = 0,096 (\text{Гн})$$

Таблица 3.1 — Расчетные параметры ветвей ФКУ

№	3	5	7	9
R_{ϑ} , Ом	27	16,2	11,57	9
L_{ϑ} , Гн	1,29	0,46	0,24	0,14

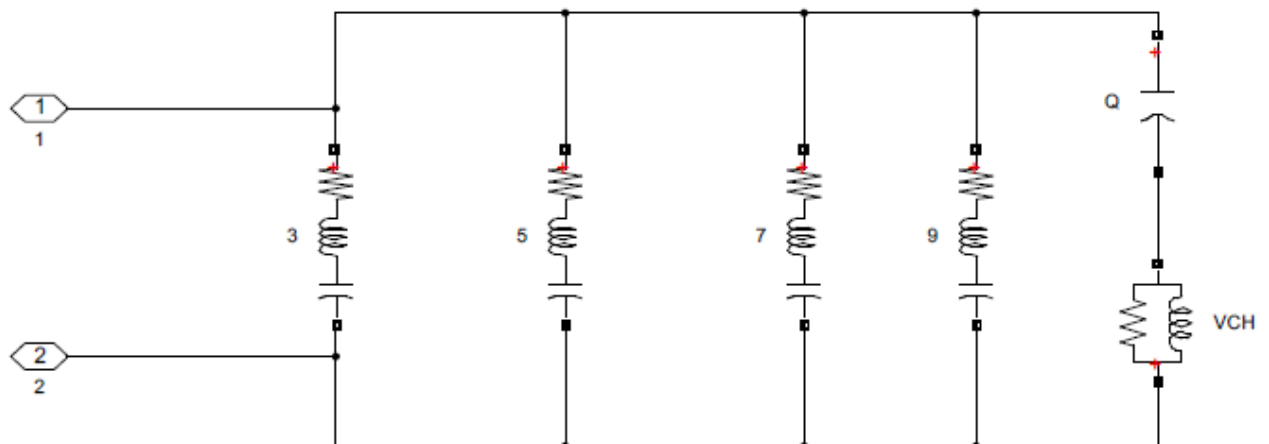


Рисунок 3.4 – Модель фильтрокомпенсирующего устройства

3.3 Этапы создания графической модели тяговой сети

Основным достоинством, связанным с использованием графического моделирования в системе MATLAB, является создание наглядной модели тяговой сети электроснабжения ЖД. На рисунке 3.5 представлена модель данного электроснабжения без установки компенсирующих устройств.

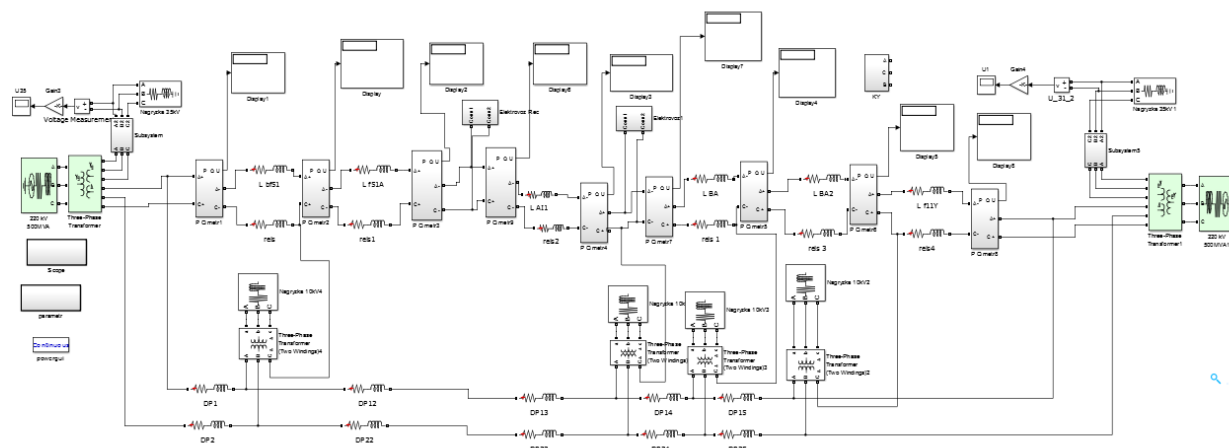


Рисунок 3.5 – Модель тяговой сети электроснабжения, созданная при помощи графического моделирования пакета Simulink системы MATLAB

Процесс создания модели сложных систем, к которым относится исследуемый участок, разбивается на несколько этапов моделирования отдельных элементов системы. Это необходимо для возможности контроля достоверности результатов моделирования, каждого элемента системы.

Первым этапом разработки модели контактной сети являлось составление модели тяговой подстанции, которая в графической модели MATLAB представлена как трехфазный источник питания и трехфазный трансформатор из библиотеки SimPowerSystems. Параметры, которые вводились в данные блоки, были взяты для тяговой подстанции ПС 220/35/27,5 с установленными трансформаторами маркой ТДТНЖ – 40000/220/35/27,5. Все необходимые данные были взяты из справочников по проектированию электроэнергетических систем [17] и нормативной документации, связанной с эксплуатацией контактных сетей [18].

Следующим этапом было составление модели контактной электрической сети. Она представляет собой две параллельные линии, состоящей из последовательно соединенных блоков Series RLC Branch. Из элементной базы данного блока RLC-цепочки мы берем активное и индуктивное сопротивления. Данный блок соответствует контактными проводами МФ 100 мм². Так же в контактную сеть был установлен блок, спроектированный для измерения мощностей и напряжения в узле, где блок установлен. В данном блоке используется элементная база библиотек пакета Simulink. Блок измерения мощностей представляет из себя подсистему, составленную из элементной базы библиотек пакета Simulink. Создание собственной подсистемы необходимо для более компактного отображения графической модели и ее наглядности [19].

Третьим промежуточным этапом сборки модели, являлось создание системы ДПР. Эта часть схемы собирается аналогично совокупности тяговых подстанций и контактной сети. Состоит из следующей элементной базы: трехфазных двухобмоточных трансформаторов, блоков Three-Phase Parallel RLC Load, моделирующих трехфазную нагрузку 10 кВ, и блоков Series RLC Branch, состоящих из активных и индуктивных сопротивлений [20]. Система ДПР соответствует воздушной линии 27 кВ, используются провода марки АС–240 мм². Так же к этому этапу добавляется установка компенсирующих устройств, расчет которых был указан выше, в контактную сеть [21]. Модели устройства продольной компенсации соответствует блок Series RLC Branch, элементная база блока основана на емкостном сопротивлении. Модель устройства поперечной компенсации состоит из последовательно соединенных блоков Series RLC Branch, с выбранным индуктивным сопротивлением, и Series RLC Load с выбранной реактивной емкостной нагрузкой.

Последним этапом создания графической модели является конструирование ЭПС в разных режимах работы. За основу было взято техническое описание электровоза «ЕРМАК» [22]. На основе библиотек пакета Simulink было создано две подсистемы электровозов. Первая подсистема «Elektrovoz» (Рисунок 3.6) соответствует тяговому электроприводу в

двигательном режиме (Рисунок 3.7). Вторая подсистема «Elektrovoz Res» (Рисунок 3.8) соответствует электроприводу тяги, находящемуся в режиме рекуперации (Рисунок 3.9). Данные подсистемы состоят из следующей элементной базы моделей: тяговый трансформатор, реверсивный тиристорный преобразователь и электродвигатели в рассматриваемых режимах.

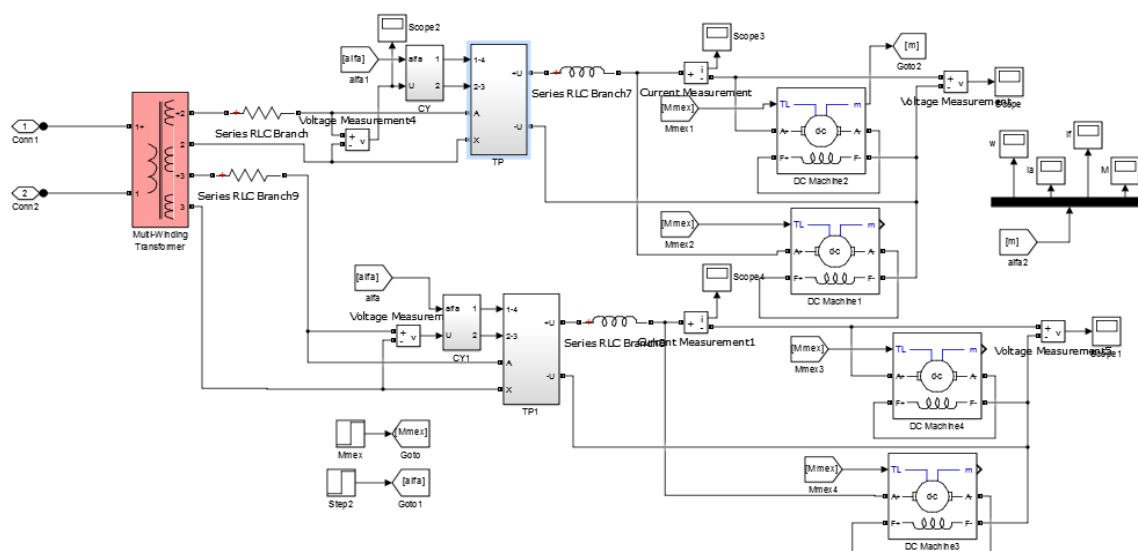


Рисунок 3.6 – Модель тягового электропривода в двигательном режиме, созданная при помощи графического моделирования пакета Simulink системы MATLAB

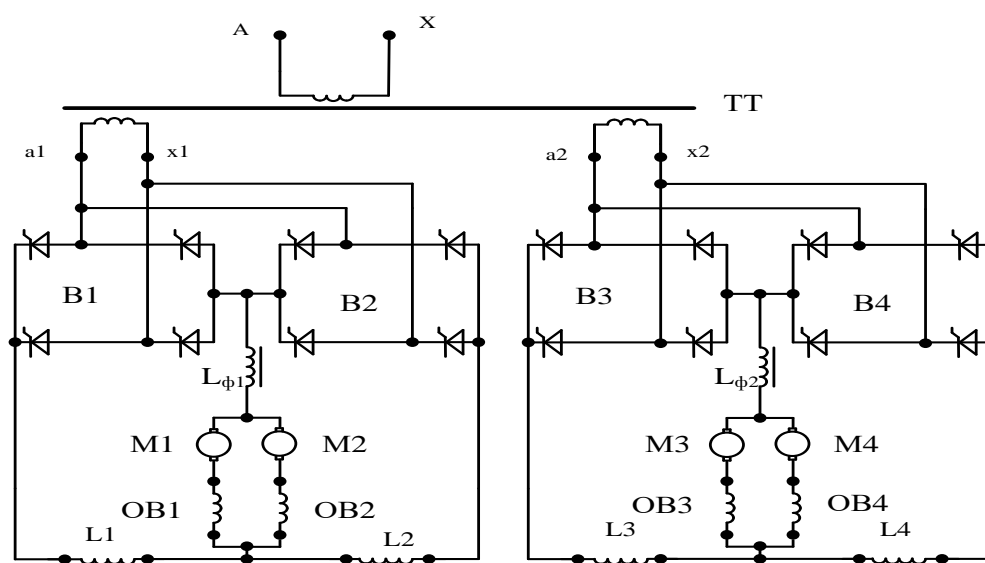


Рисунок 3.7 – Функциональная схема электропривода тяги в двигательном режиме

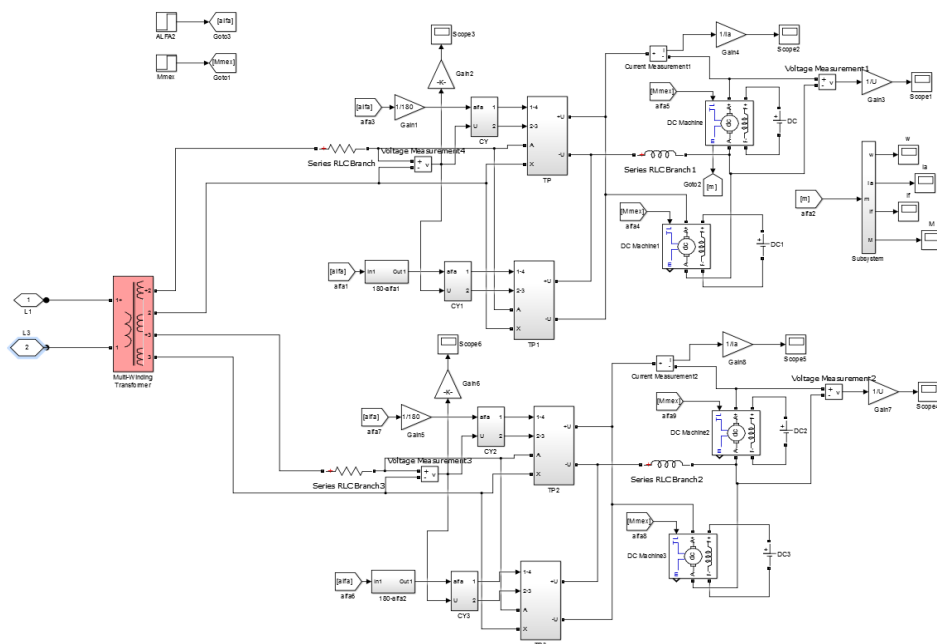


Рисунок 3.8 – Модель тягового электропривода в рекуперативном режиме, созданная при помощи графического моделирования пакета Simulink системы MATLAB

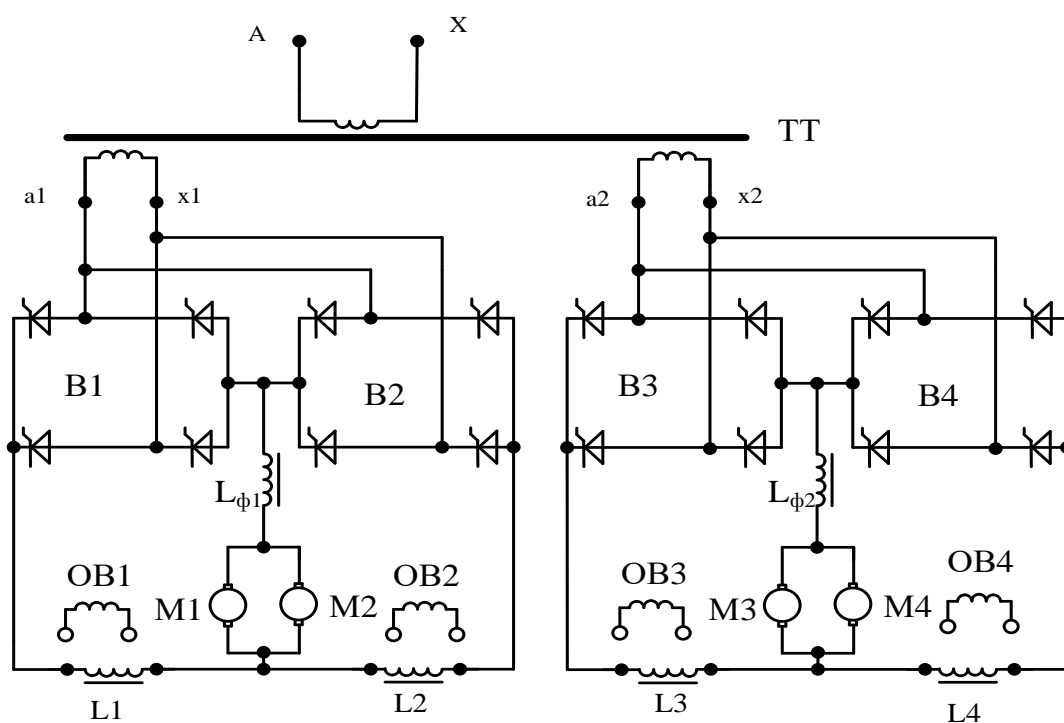


Рисунок 3.9 – Функциональная схема электропривода тяги в рекуперативном режиме

4 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при разных местах установки различных компенсирующих устройств

Исследуемый участок контактных сетей был условно разделен на два участка: Бискамжа – Югачи и Югачи – Камышта. Условное разделение участков производится по границам тяговой подстанции Югачи. Компенсация реактивной мощности присутствует только на ТП Бискамжа. На оставшихся двух подстанциях компенсация отсутствует, поэтому участок Югачи – Камышта моделироваться не будет.

Произведем моделирование режимов с установкой различных типов компенсирующих устройств в разных местах контактной сети.

4.1 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке продольной компенсации на ТП

Произведем моделирование контактной сети, при условии, что два ЭПС проходят по путям Нанхчульского тоннеля и один ЭПС проходит у ТП Югачи. В сети установлены продольные компенсационные устройства на ТП Бискамжа и ТП Югачи. В таблице 4.1 представлены величины напряжений в различных точках участка контактной сети, полученные в результате моделирования.

Таблица 4.1 – Напряжения в различных точках контактной сети, при прохождении трех электровозов, с установкой ПДК на двух ТП

Путь	Напряжение, о.е.					
	Бискамжа	в конце отсасывающей линии 1	до ЭПС	после ЭПС	в конце отсасывающей линии 2	Югачи
1	0,9216	0,97	–	0,9198	0,9113	0,9234
2	0,9216	0,9724	0,9337	0,9316	0,9653	0,9234

По данным таблицы 4.1 были построены гистограммы напряжений в разных точках КС, для обоих путей. Гистограммы представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

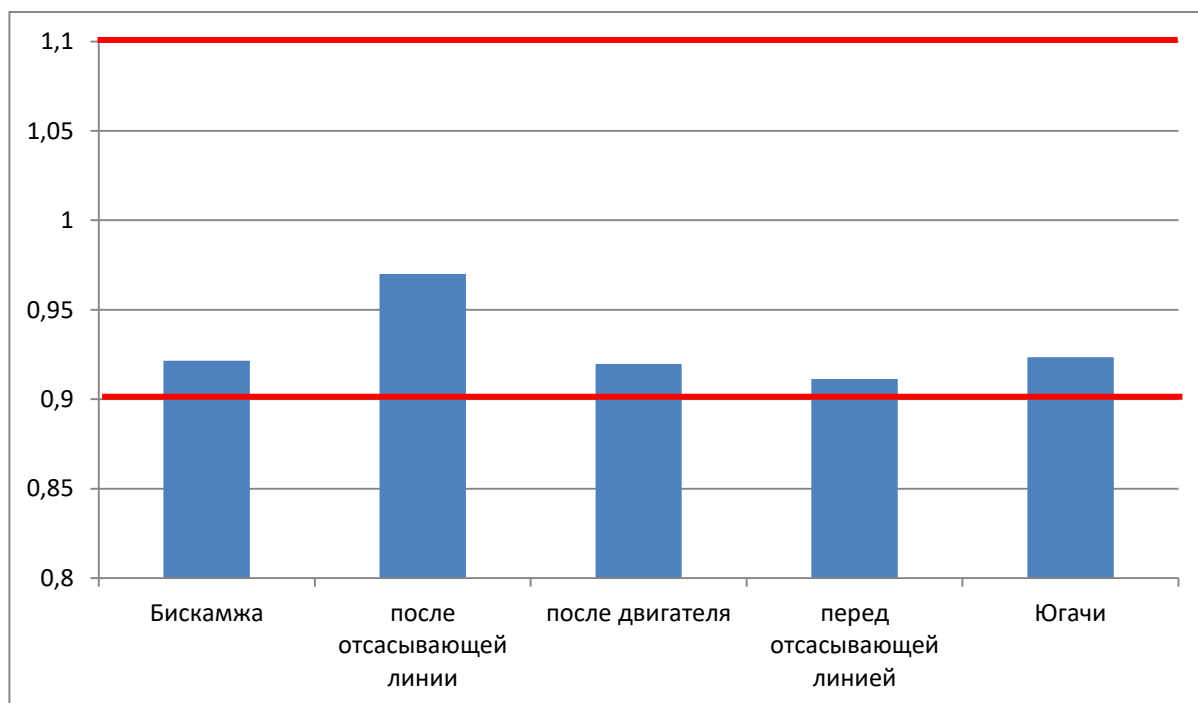


Рисунок 4.1 – Гистограмма напряжений на первом пути

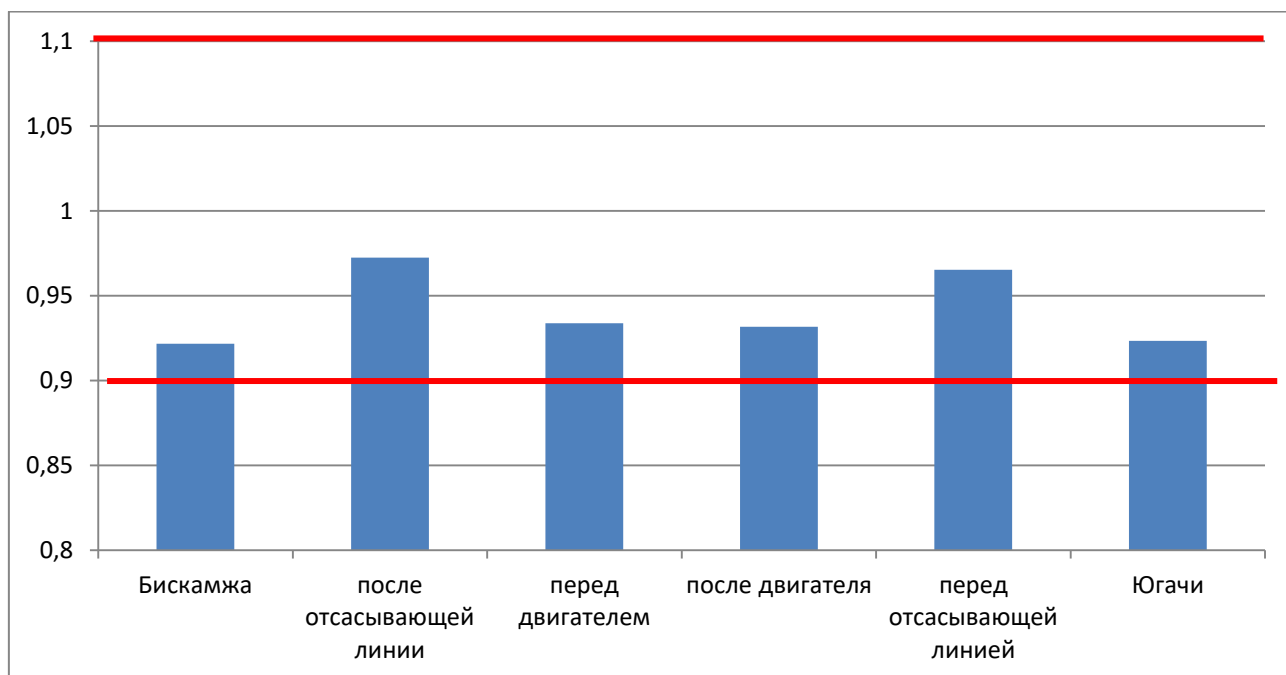


Рисунок 4.2 – Гистограмма напряжений на втором пути

На рисунках 4.3 – 4.4 представлены осциллограммы напряжения, построенные по результатам моделирования.

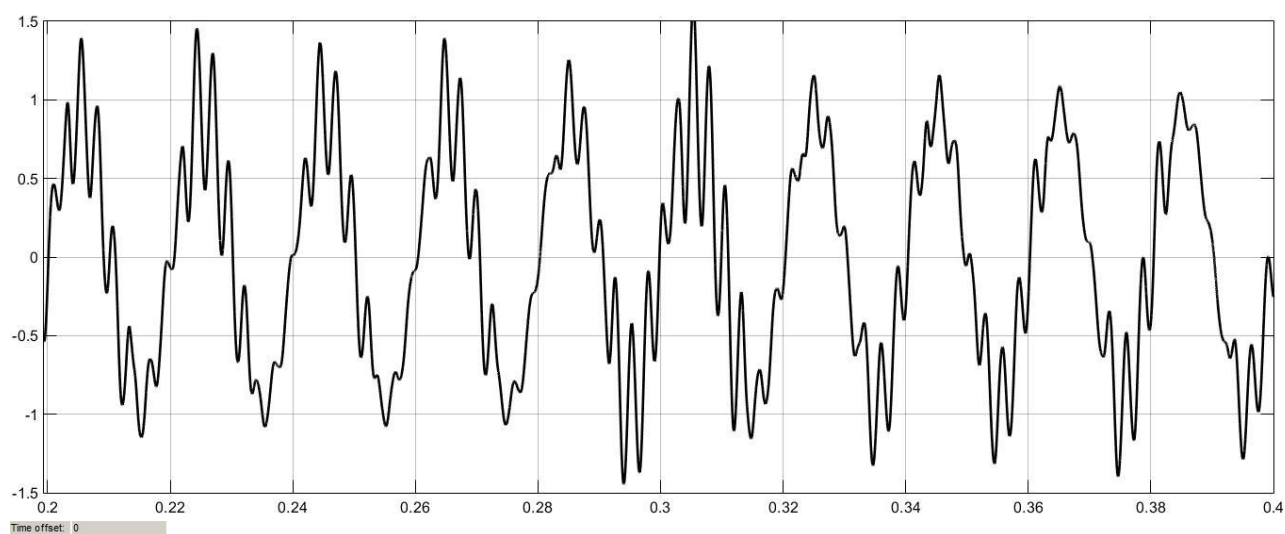


Рисунок 4.3 – Осциллограмма напряжения на шинах 27кВ ТП Бискамжа

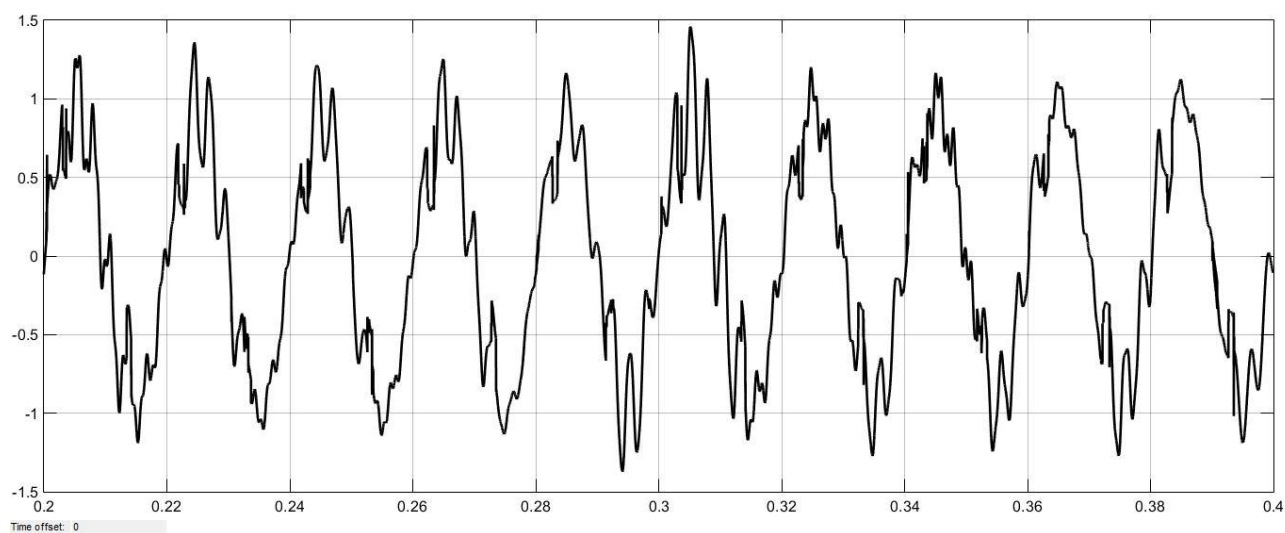


Рисунок 4.4 – Осциллограмма напряжения в месте прохождения ЭПС

В соответствии с результатами гармонического анализа осциллограмм напряжения на шинах 27 кВ тяговых подстанций и в местах прохождения электровозов, была составлена таблица 4.2.

Таблица 4.2 – Гармонический состав напряжения

№ гармоники	ГОСТ, %	Процентное содержание гармоник			
		ТП Бискамжа	1 путь	2 путь	ТП Югачи
3	3	4,72	7,99	7,06	3,65
5	4	4,99	7,37	6,59	3,32
7	3	15,19	14,76	13,55	6,26
9	1	4,43	1,25	1,38	0,12
11	2	1,02	0,86	0,59	0,74
13	2	0,59	1,32	1,06	1,11
15	1,5	0,45	1,1	0,97	1,07

По данным таблицы 4.2 были составлены сравнительные гистограммы гармонического состава, по сравнению с ГОСТ [23], для каждой точки измерения напряжения в контактной сети. Гистограммы представлены на рисунках 4.5 – 4.8.

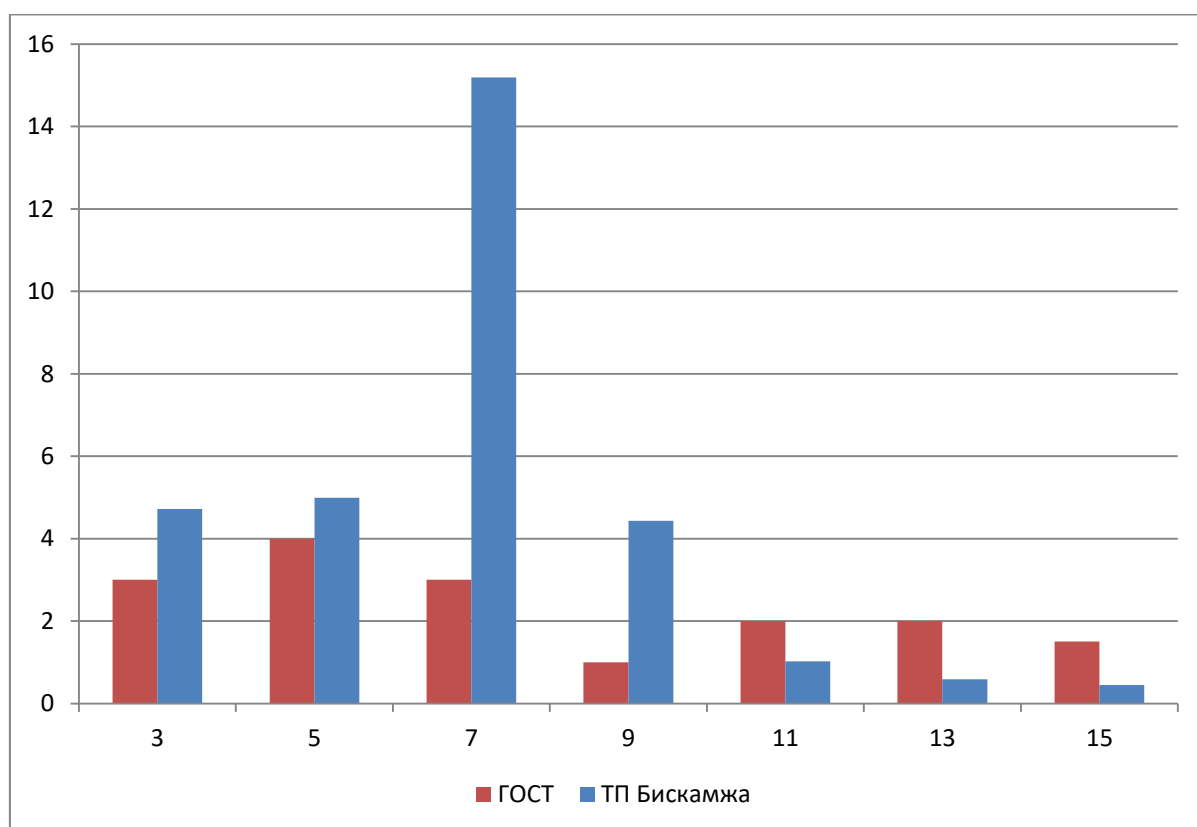


Рисунок 4.5 – Гармонический состав напряжения на шинах 27 кВ ТП Бискамжа

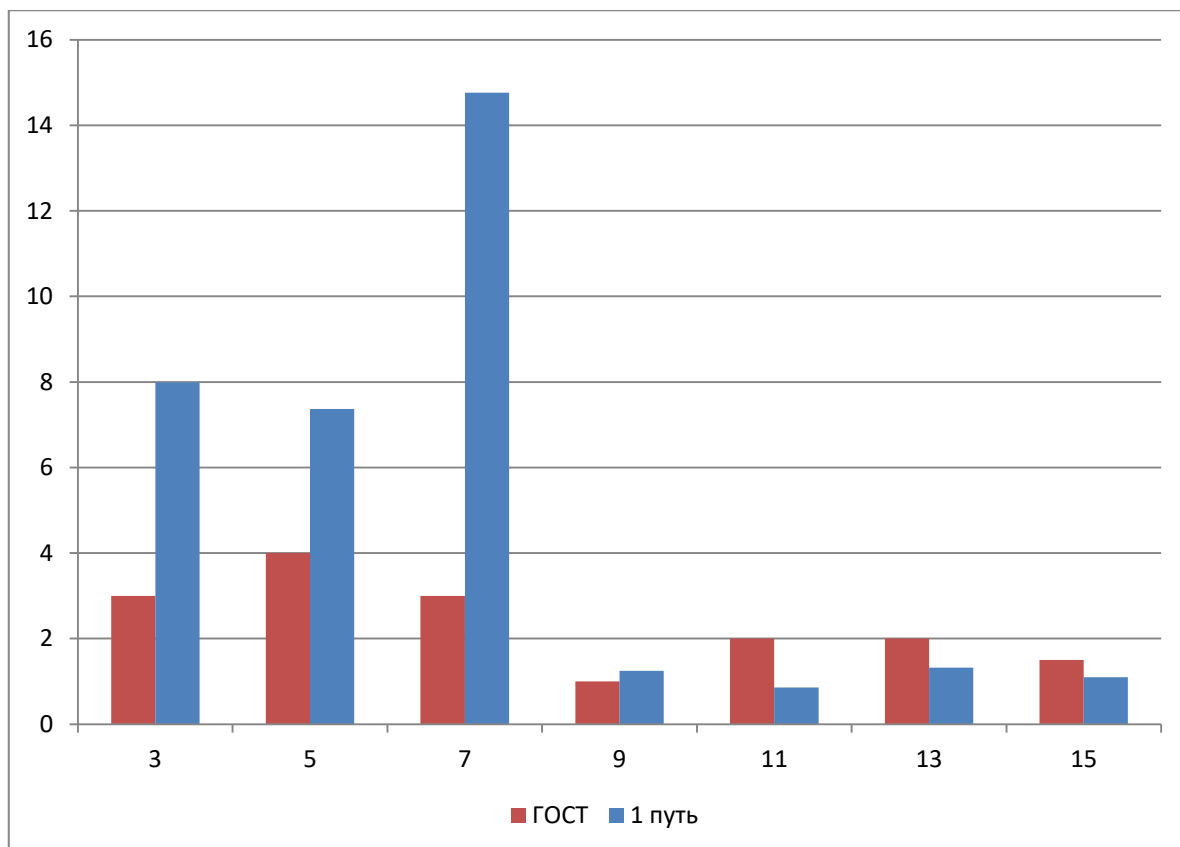


Рисунок 4.6 – Гармонический состав напряжения на первом пути
Нанхчульского тоннеля

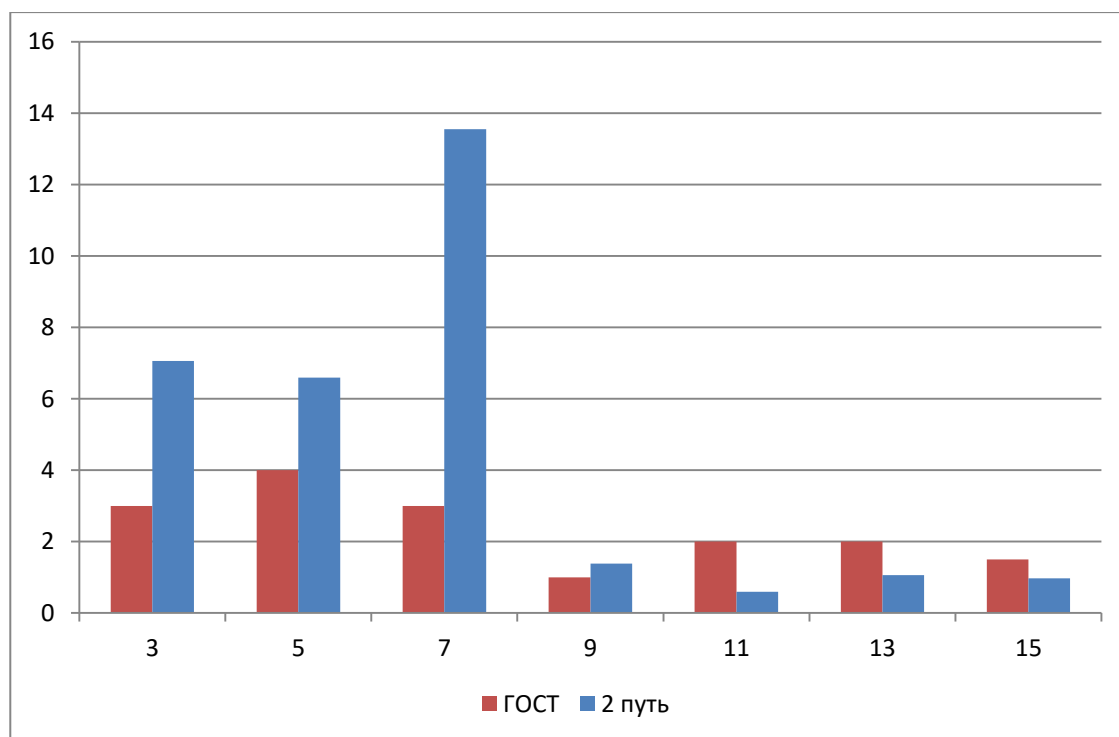


Рисунок 4.7 – Гармонический состав напряжения на втором пути
Нанхчульского тоннеля

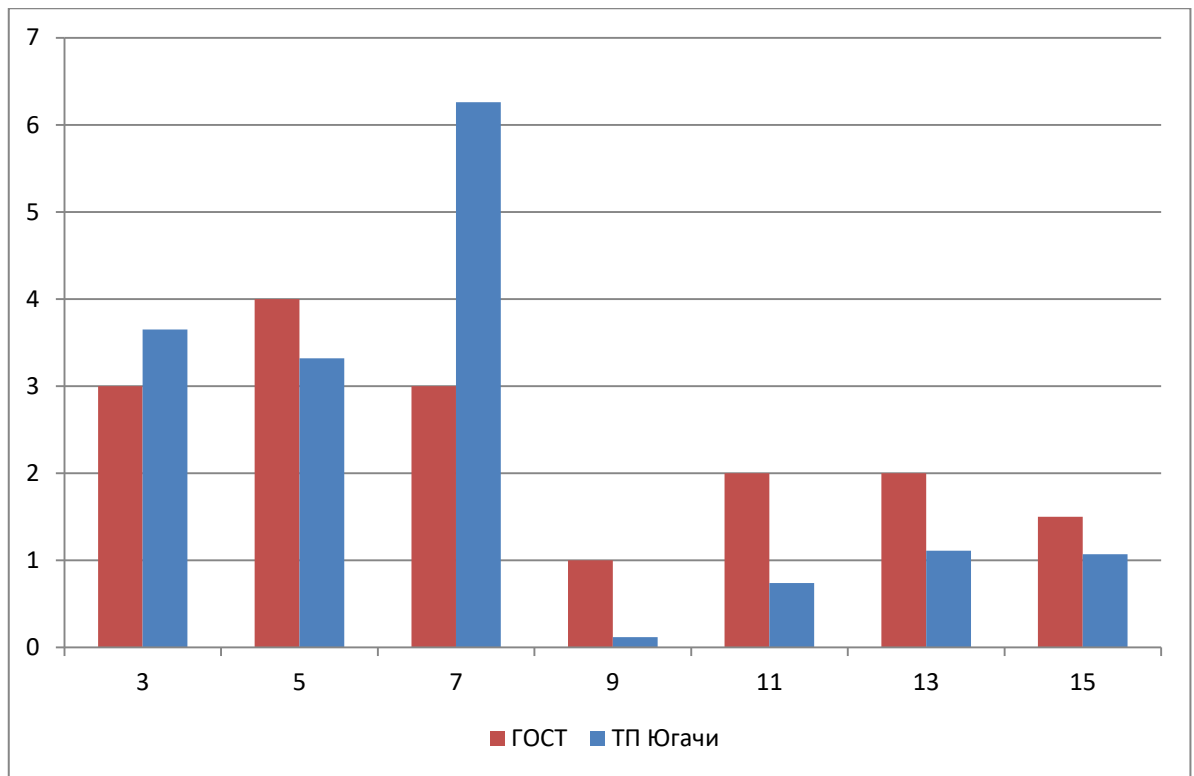


Рисунок 4.8 – Гармонический состав напряжения на ТП Югачи

На основании моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Провалы напряжения не более 10% на всем протяжении контактной сети;
2. Из-за нелинейности нагрузки ЭПС, происходят значительные искажения синусоиды напряжения;
3. Во всех точках снятия кривой напряжения контактной сети, гармонический состав выходит за пределы ГОСТ, максимальна гармоника №7;
4. Гармоники наиболее сильно искажают кривую напряжения в месте прохождения ЭПС.

4.2 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке продольной компенсации на посту секционирования

Произведем моделирование контактной сети, при условии, что два ЭПС проходят по путям Нанхчульского тоннеля и один ЭПС проходит у ТП Югачи. В сети установлены ПДК на посту секционирования. В таблице 4.3 представлены величины напряжений в различных точках участка контактной сети, полученные в результате моделирования.

Таблица 4.3 – Напряжения в различных точках контактной сети, при прохождении трех электровозов, с установкой ПДК на посту секционирования

Путь	Напряжение, о.е.					
	Бискамжа	в конце отсасывающей линии 1	до ЭПС	после ЭПС	в конце отсасывающей линии 2	Югачи
1	0,9298	0,919	–	0,8942	0,8532	0,917
2	0,9298	0,9203	0,8792	0,8762	0,913	0,917

По данным таблицы 4.3 были построены гистограммы напряжений в разных точках КС, для обоих путей. Гистограммы представлены на рисунках 4.9 и 4.10.



Рисунок 4.9 – Гистограмма напряжений на первом пути



Рисунок 4.10 – Гистограмма напряжений на втором пути

На рисунках 4.11 – 4.12 представлены осциллограммы напряжения, построенные по результатам моделирования.

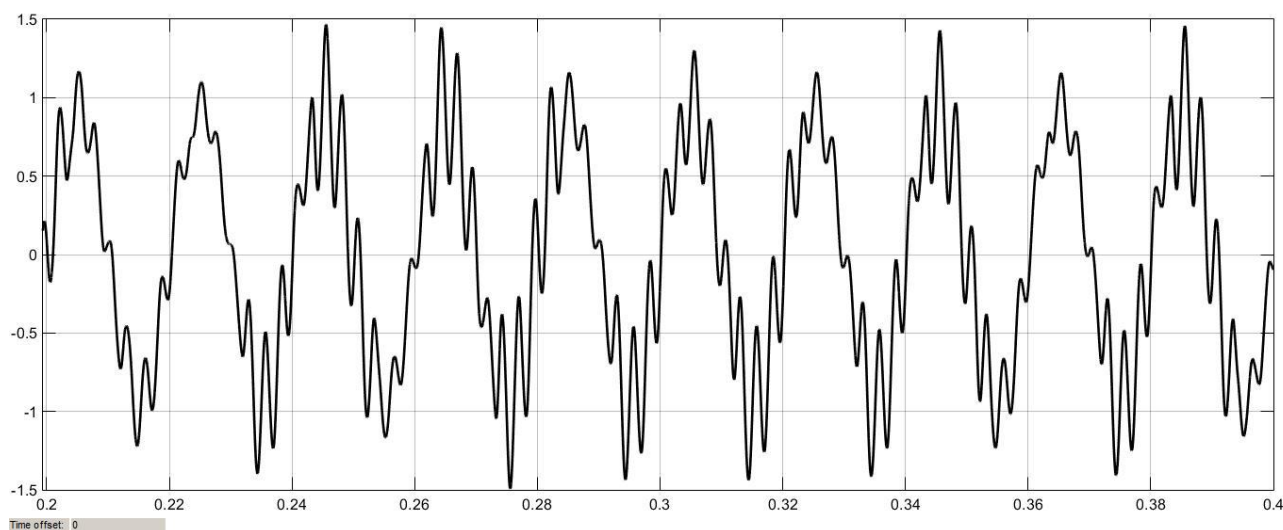


Рисунок 4.11 – Осциллограмма напряжения на шинах 27кВ ТП Бискамжа

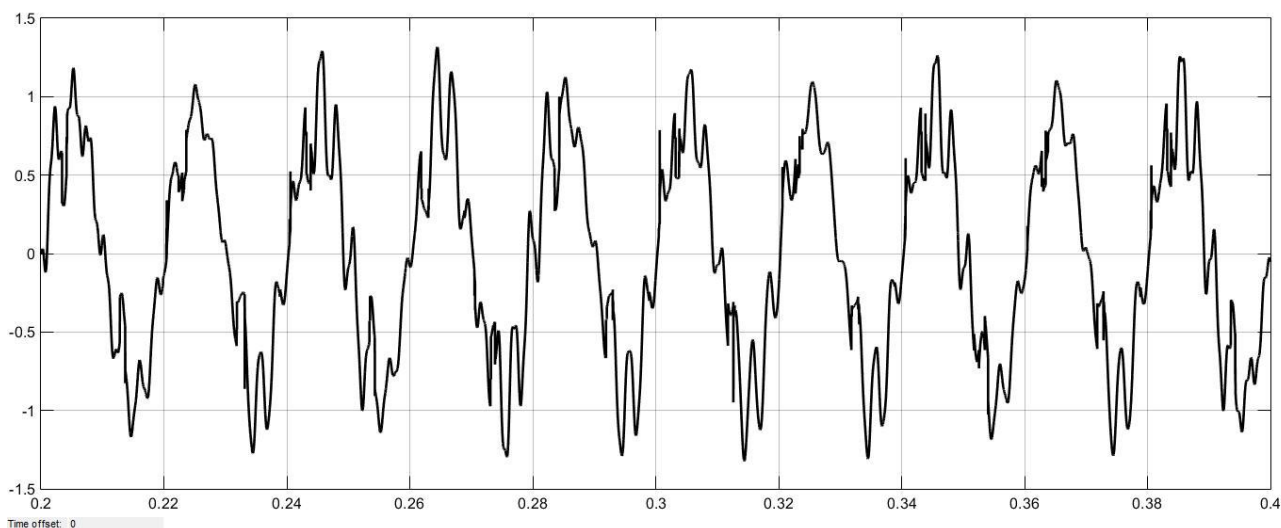


Рисунок 4.12 – Осциллограмма напряжения в месте прохождения ЭПС

В соответствии с результатами гармонического анализа осциллограмм напряжения на шинах 27 кВ тяговых подстанций и в местах прохождения электровозов, была составлена таблица 4.4.

Таблица 4.4 – Гармонический состав напряжения

№ гармоники	ГОСТ, %	Процентное содержание гармоник			
		ТП Бискамжа	1 путь	2 путь	ТП Югачи
3	3	3,94	7,84	7,02	3,4
5	4	3,03	4,92	4,21	2,07
7	3	10,5	10,5	9,28	4,11
9	1	0,22	0,38	0,19	0,15
11	2	1,75	0,94	0,97	0,72
13	2	0,91	1,4	1,55	1,1
15	1,5	0,24	0,85	1,16	0,89

По данным таблицы 4.4 были составлены сравнительные гистограммы гармонического состава, для каждой точки измерения напряжения в контактной сети. Гистограммы представлены на рисунках 4.13 – 4.16.

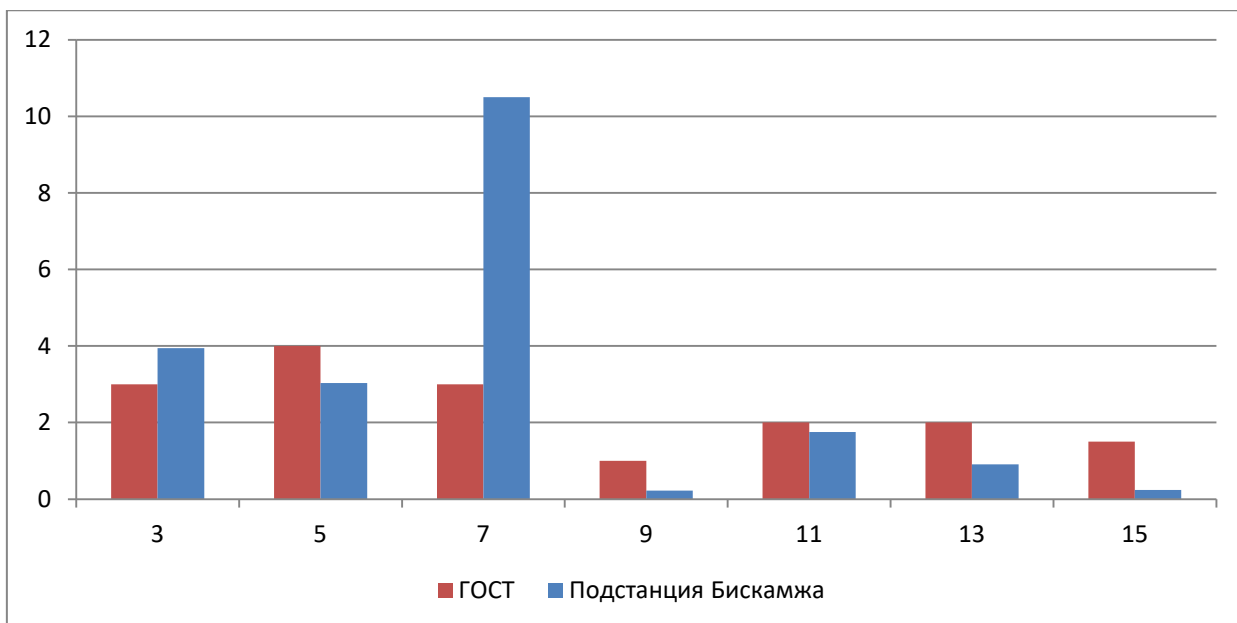


Рисунок 4.13 – Гармонический состав напряжения на шинах 27 кВ ТП Бискамжа

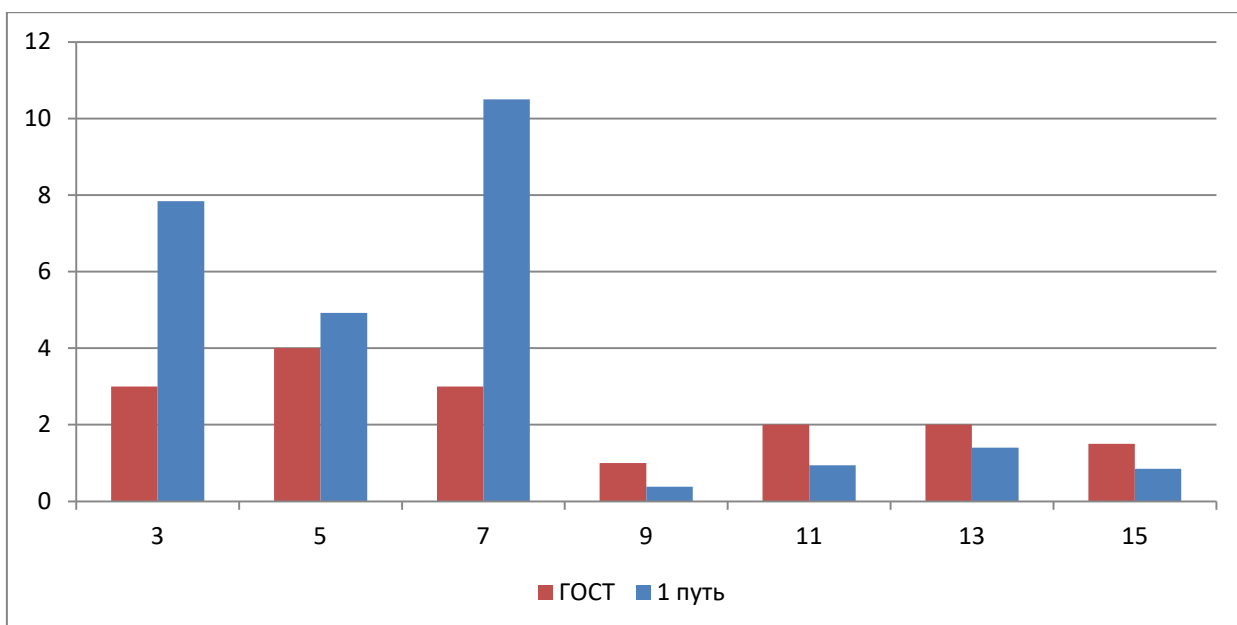


Рисунок 4.14 – Гармонический состав напряжения на первом пути Нанхчульского тоннеля

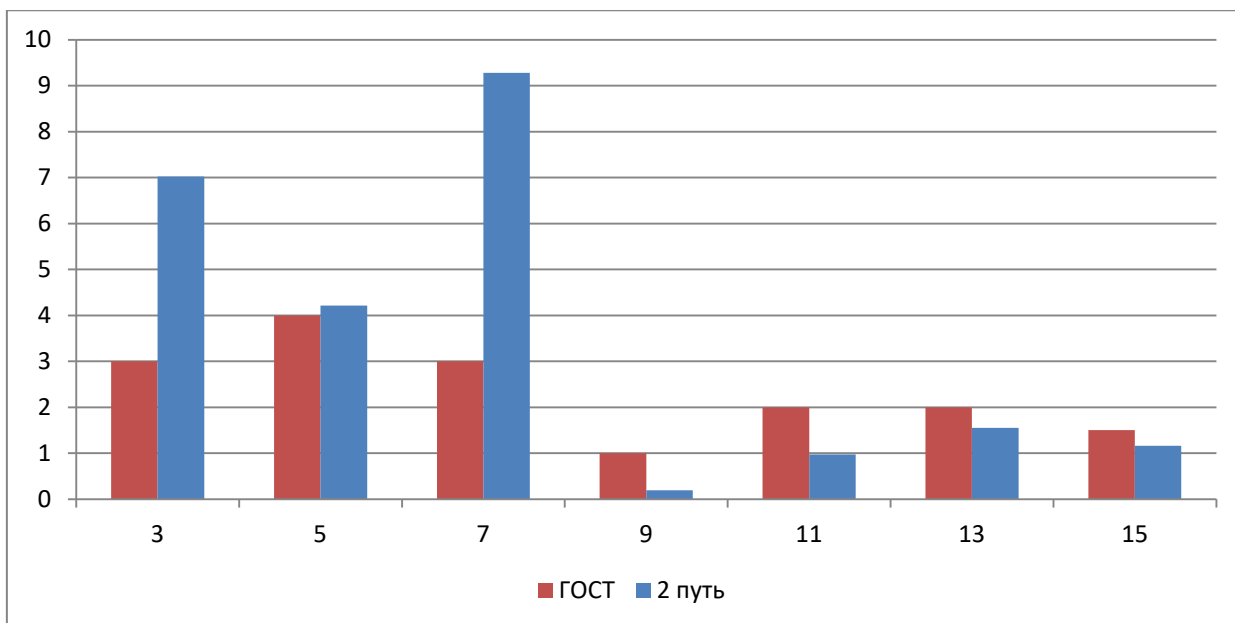


Рисунок 4.15 – Гармонический состав напряжения на втором пути
Нанхчульского тоннеля

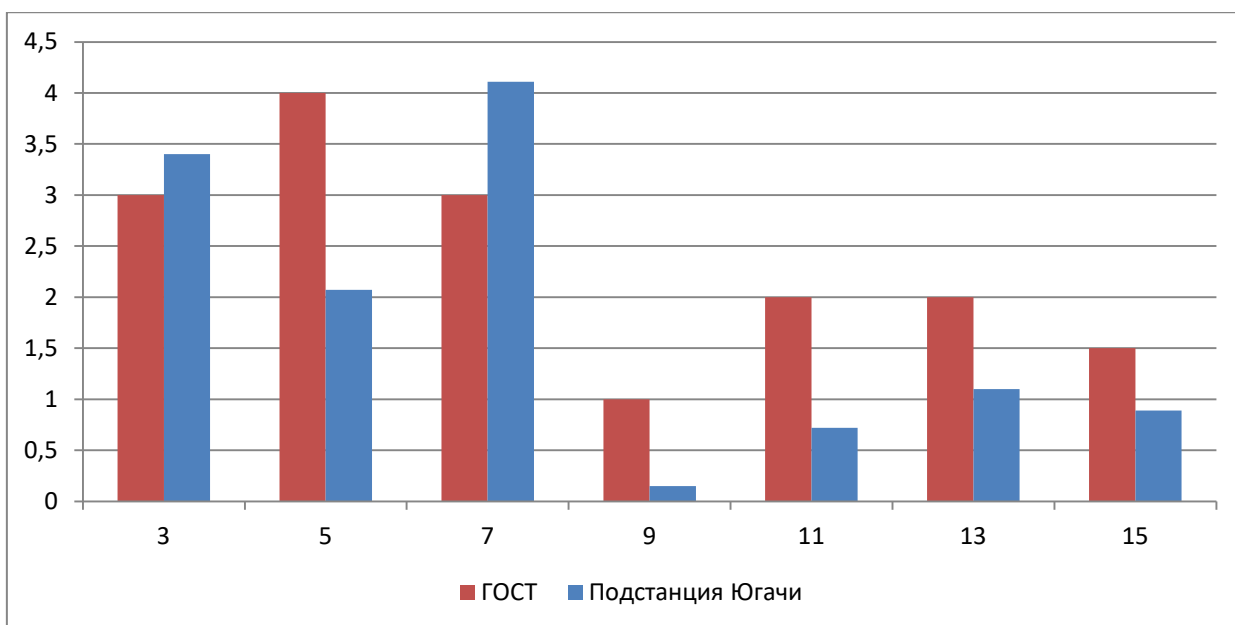


Рисунок 4.16 – Гармонический состав напряжения на ТП Югачи

На основании моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдаются провалы напряжения более 10% на зажимах тяговых трансформаторов ЭПС;
2. Установка ПДК в одном месте увеличивает потери напряжения;

3. На всей протяженности контактной сети 3, 5 и 7 гармоники выходят за пределы ГОСТ;

4. Значительно искажается кривая напряжения при наличии ПДК в одном месте.

4.3 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке поперечной компенсации на ТП

Произведем моделирование контактной сети, при условии, что два ЭПС проходят по путям Нанхчульского тоннеля и один ЭПС проходит у ТП Югачи. В сети установлены поперечные компенсационные устройства на ТП Бискамжа и ТП Югачи. В таблице 4.5 представлены величины напряжений в различных точках участка контактной сети, полученные в результате моделирования.

Таблица 4.5 – Напряжения в различных точках контактной сети, при прохождении трех электропоездов, с установкой ППК на двух ТП

Путь	Напряжение, о.е.					
	Бискамжа	в конце отсасывающей линии 1	до ЭПС	после ЭПС	в конце отсасывающей линии 2	Югачи
1	0,9278	0,9734	–	0,9255	0,9149	0,933
2	0,9278	0,9374	0,923	0,9249	0,9576	0,933

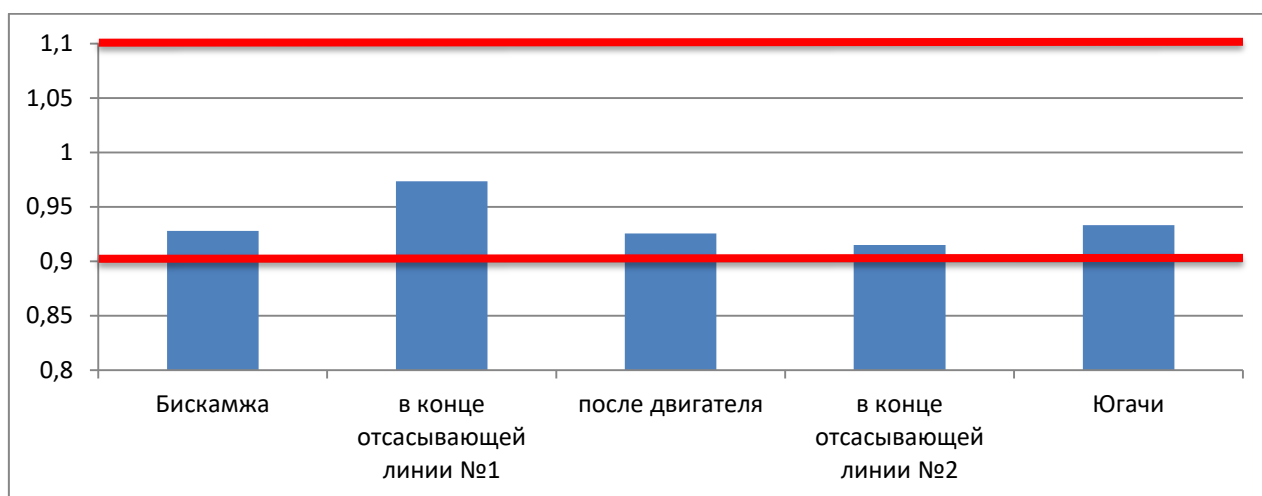


Рисунок 4.17 – Гистограмма напряжений на первом пути

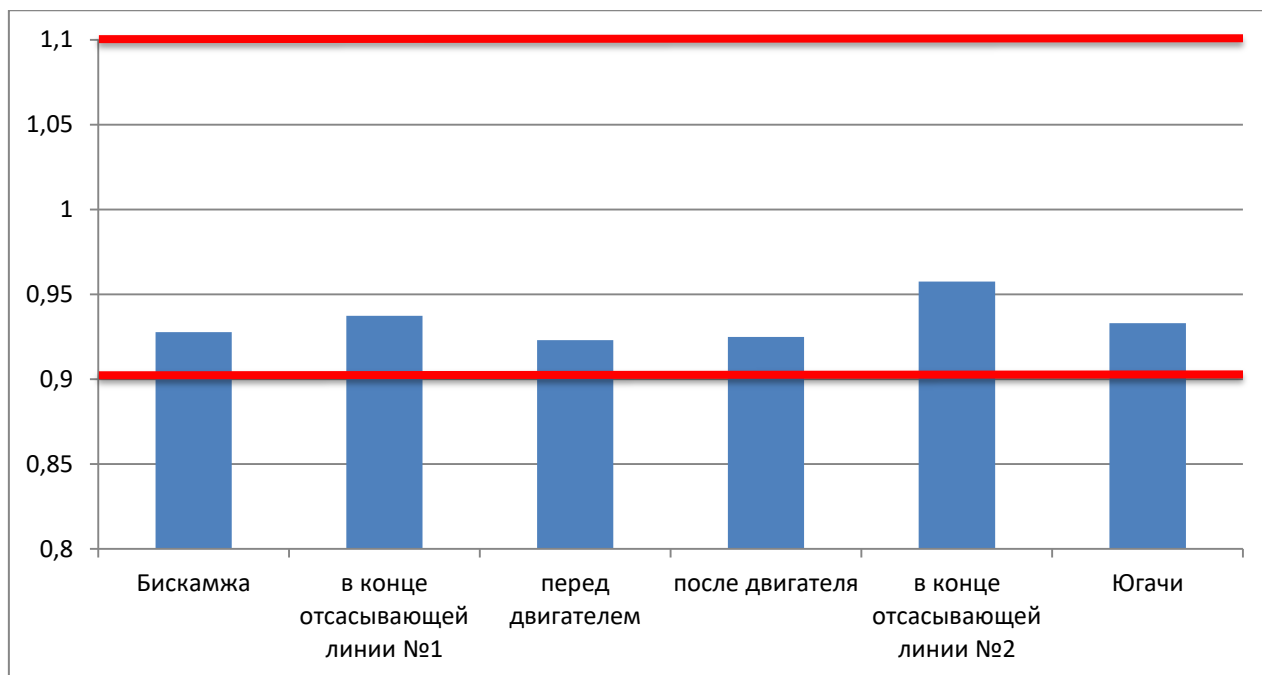


Рисунок 4.18 – Гистограмма напряжений на втором пути

На рисунках 4.19 – 4.20 представлены осциллограммы напряжения, построенные по результатам моделирования.

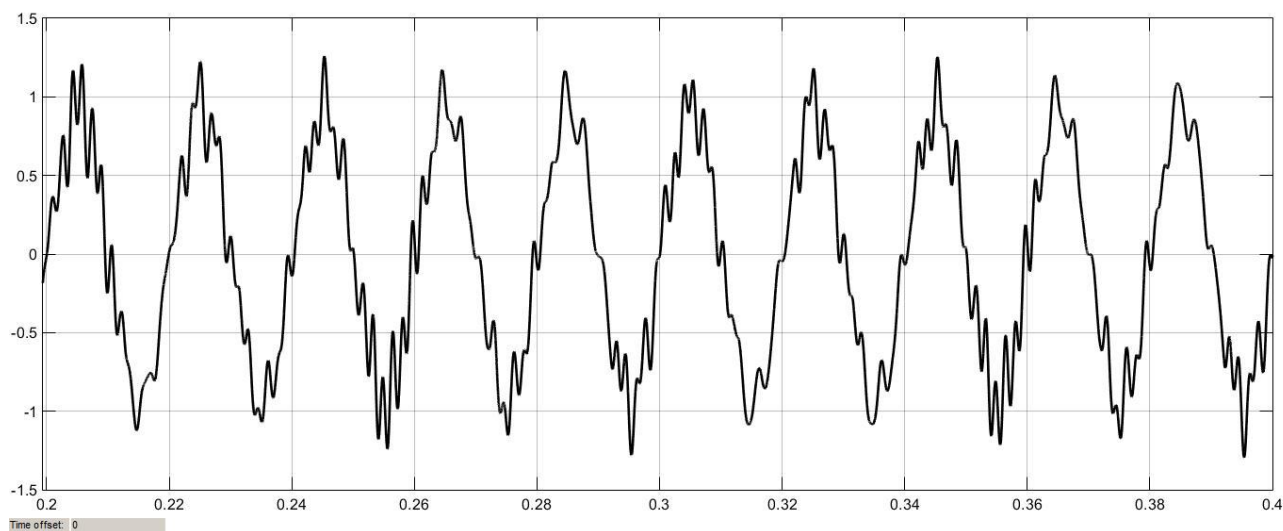


Рисунок 4.19 – Осциллограмма напряжения на шинах 27кВ ТП Бискамжа

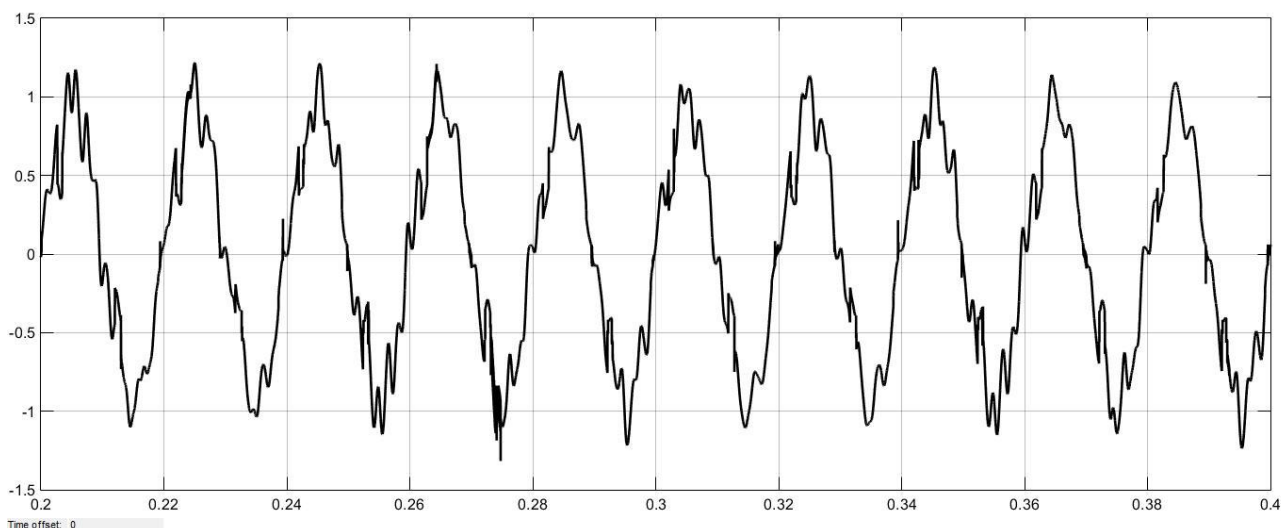


Рисунок 4.20 – Осциллограмма напряжения в месте прохождения ЭПС

В соответствии с результатами гармонического анализа осциллограмм напряжения на шинах 27 кВ тяговых подстанций и в местах прохождения электровозов, была составлена таблица 4.6.

Таблица 4.6 – Гармонический состав напряжения

№ гармоники	ГОСТ, %	Процентное содержание гармоник			
		ТП Бискамжа	1 путь	2 путь	ТП Югачи
3	3	4,71	8,44	8,56	3,97
5	4	6,67	9,97	13,64	5,15
7	3	8,1	5,86	23,55	5,19
9	1	1,89	3,96	4,39	1,26
11	2	3	4,25	2,03	1,17
13	2	7,01	2,85	1,93	0,42
15	1,5	0,92	0,74	0,35	0,66

По данным таблицы 4.6 были составлены сравнительные гистограммы гармонического состава, для каждой точки измерения напряжения в контактной сети. Гистограммы представлены на рисунках 4.21 – 4.24.

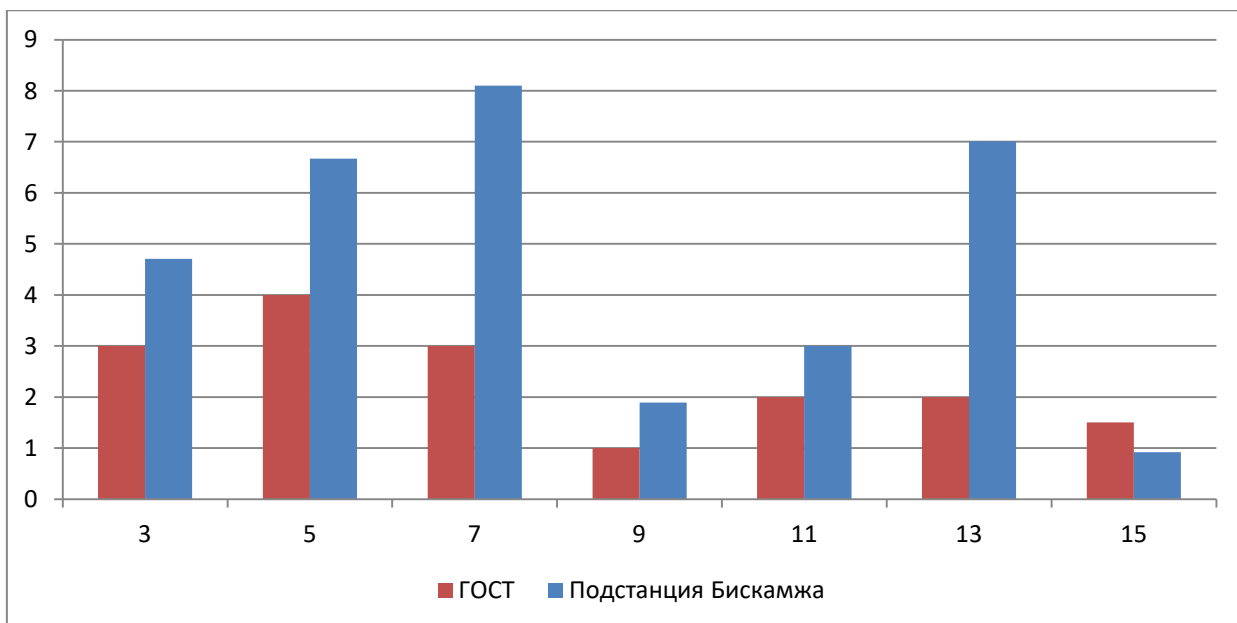


Рисунок 4.21 – Гармонический состав напряжения на шинах 27 кВ ТП Бискамжа

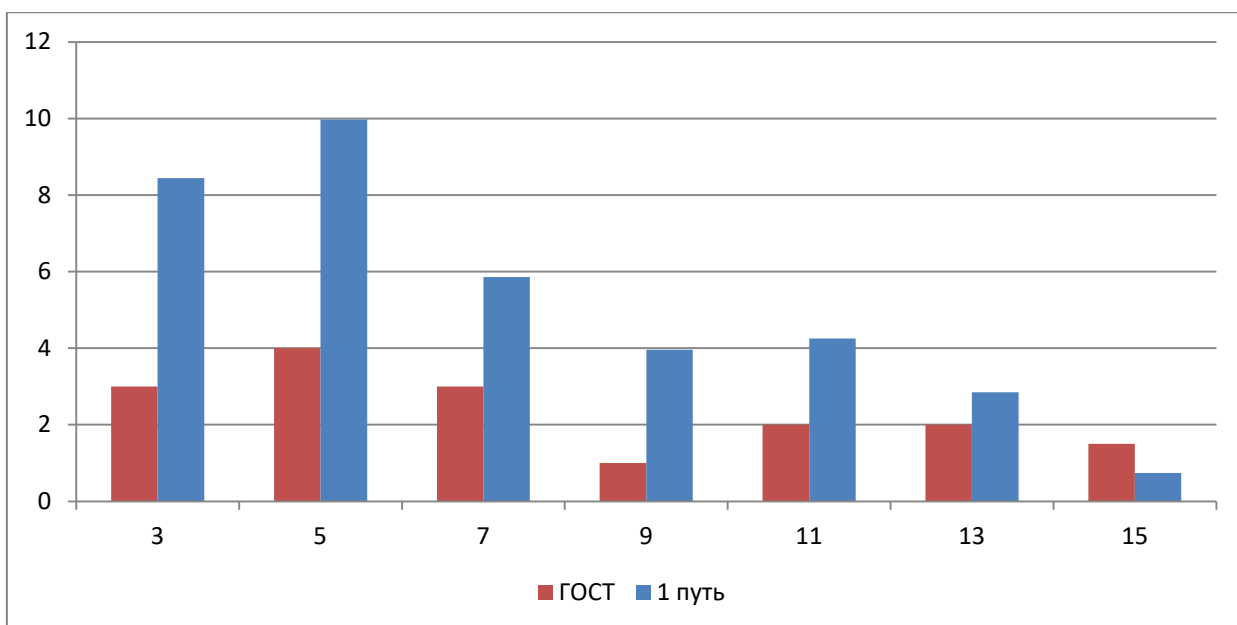


Рисунок 4.22 – Гармонический состав напряжения на первом пути Нанхчульского тоннеля

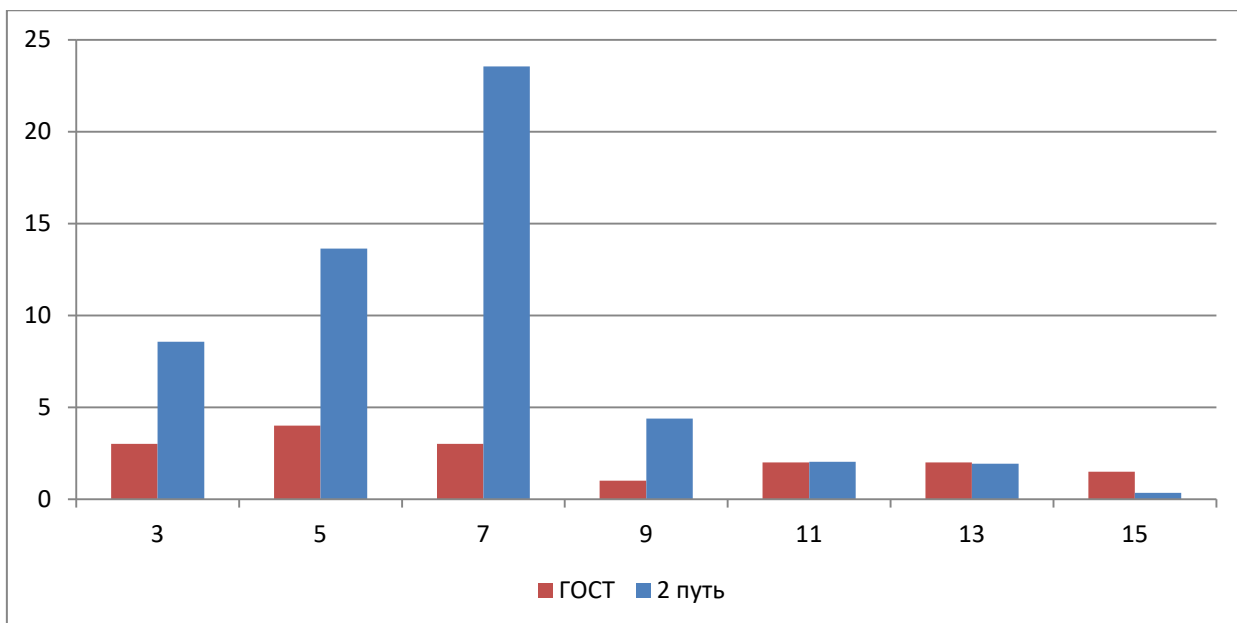


Рисунок 4.23 – Гармонический состав напряжения на втором пути
Нанхчульского тоннеля

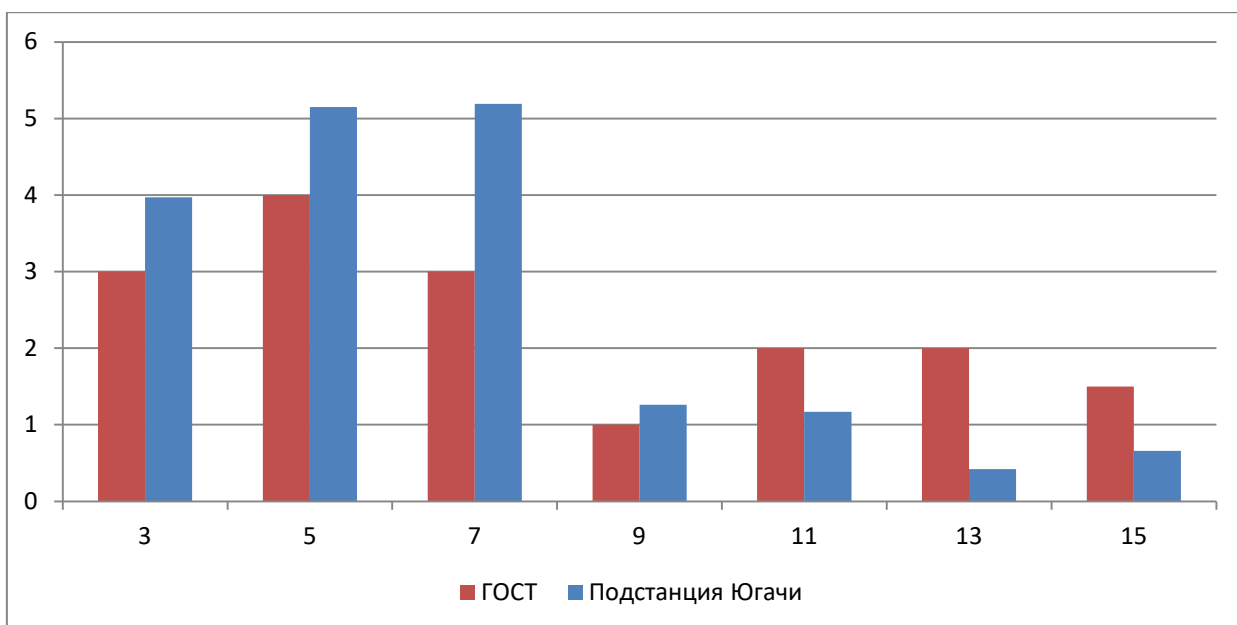


Рисунок 4.24 – Гармонический состав напряжения на ТП Югачи

На основании моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Провалы напряжения не более 10% на всей протяженности контактной сети;
2. На всей протяженности контактной сети гармонический состав выходит за пределы ГОСТ;

3. Наблюдается уменьшение искажения кривой напряжения и уменьшение процентного содержания гармоник, нежели при продольной компенсации;

4.4 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке поперечной компенсации на посту секционирования

Произведем моделирование контактной сети, при условии, что два ЭПС проходят по путям Нанхчульского тоннеля и один ЭПС проходит у ТП Югачи. В сети установлены ППК на посту секционирования. В таблице 4.7 представлены величины напряжений в различных точках участка контактной сети, полученные в результате моделирования.

Таблица 4.7 – Напряжения в различных точках контактной сети, при прохождении трех электровозов, с установкой ППК на посту секционирования

Путь	Напряжение, о.е.					
	Бискамжа	в конце отсасывающей линии 1	до ЭПС	после ЭПС	в конце отсасывающей линии 2	Югачи
1	0,8979	0,9673	–	0,8973	0,8908	0,9106
2	0,8979	0,8966	0,8796	0,8834	0,9313	0,9106

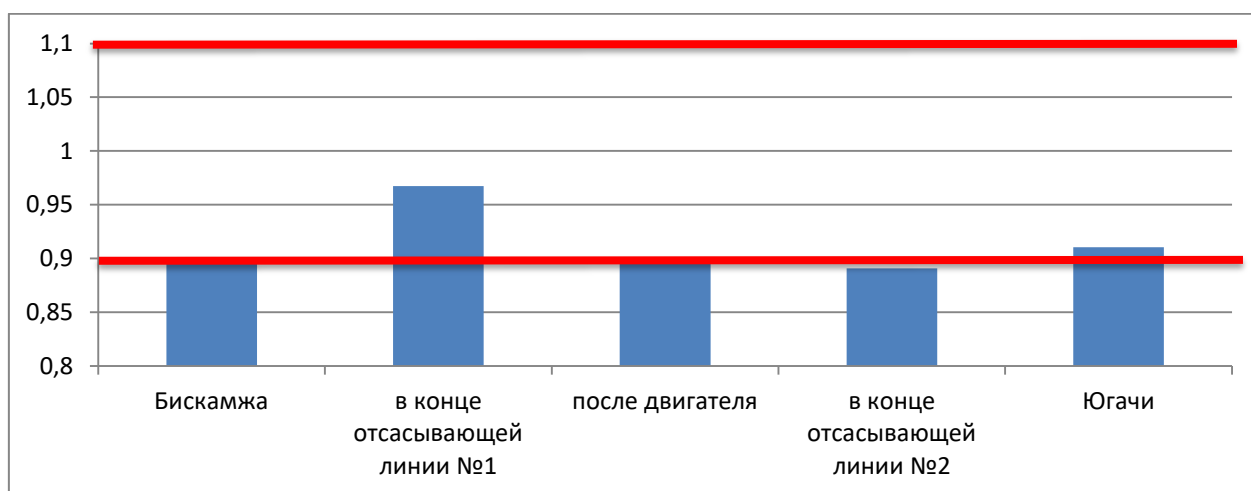


Рисунок 4.25 – Гистограмма напряжений на первом пути

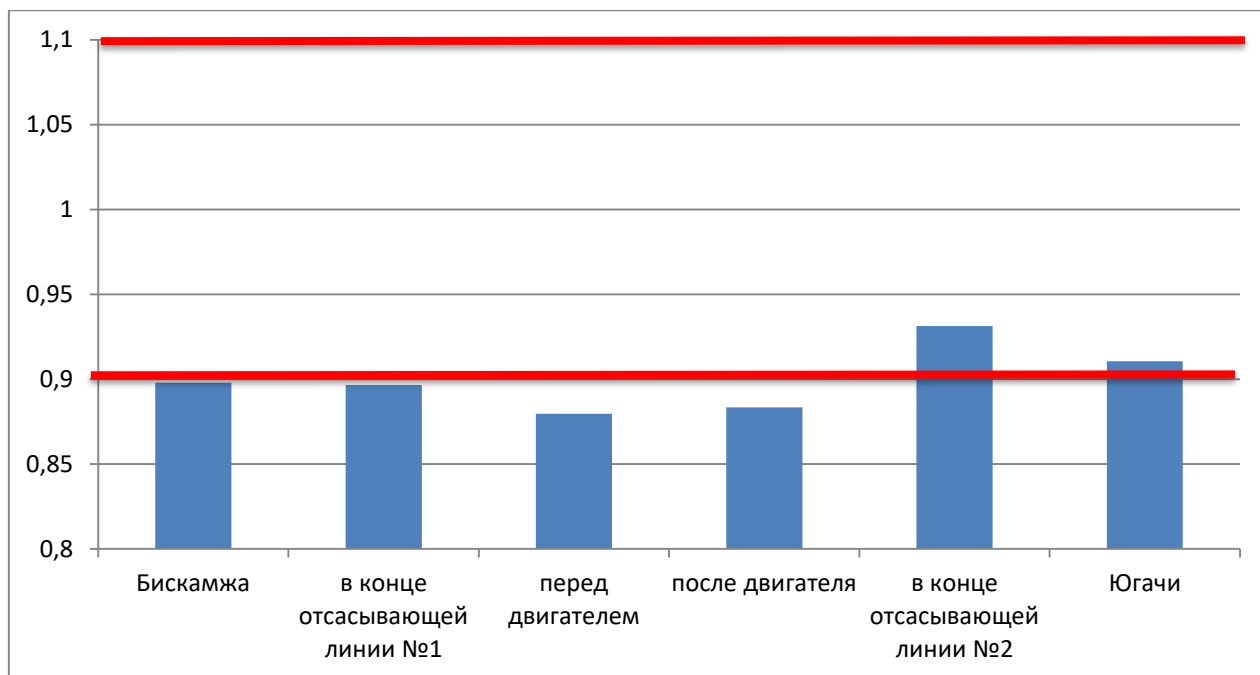


Рисунок 4.26 – Гистограмма напряжений на втором пути

На рисунках 4.27 – 4.28 представлены осциллограммы напряжения, построенные по результатам моделирования.

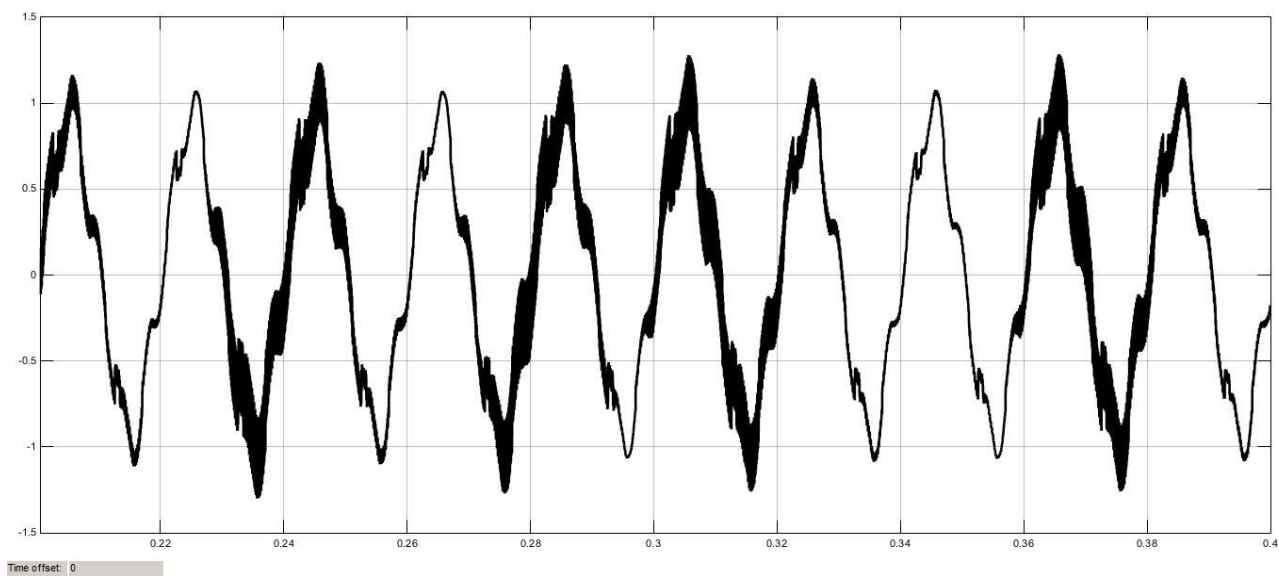


Рисунок 4.27 – Осциллограмма напряжения на шинах 27кВ ТП Бискамжа

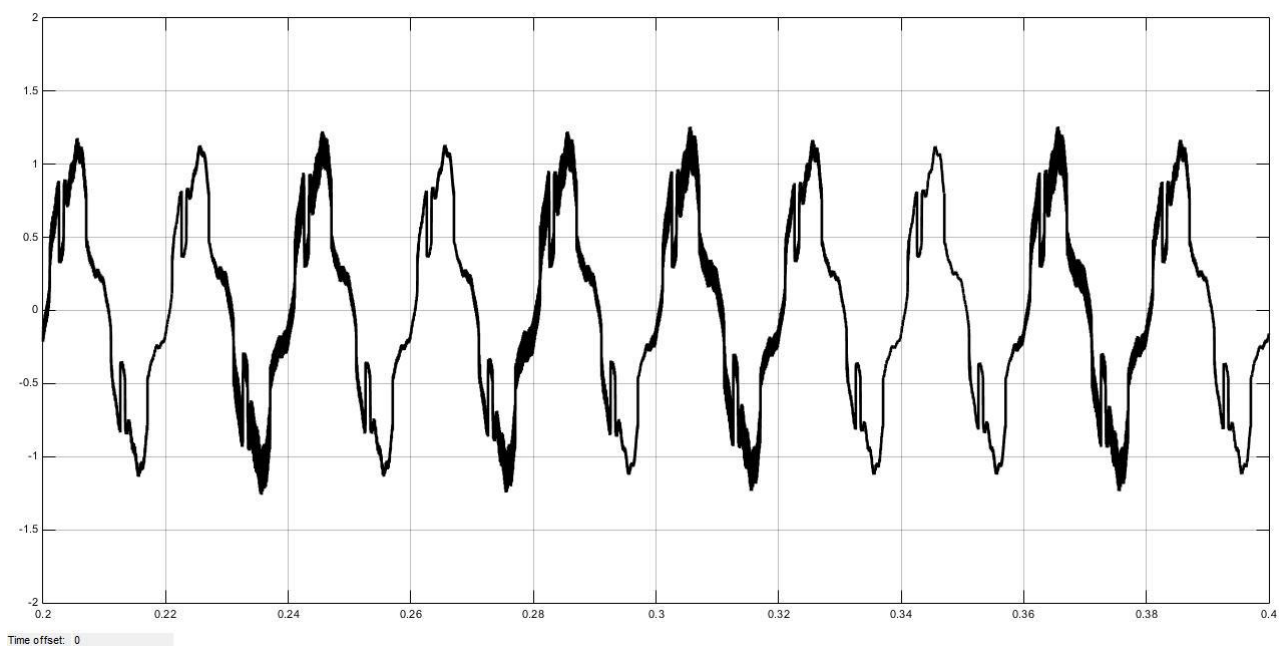


Рисунок 4.28 – Осциллограмма напряжения в месте прохождения ЭПС

В соответствии с результатами гармонического анализа осциллограмм напряжения на шинах 27 кВ тяговых подстанций и в местах прохождения электровозов, была составлена таблица 4.8.

Таблица 4.8 – Гармонический состав напряжения

№ гармоники	ГОСТ, %	Процентное содержание гармоник			
		ТП Бискамжа	1 путь	2 путь	ТП Югачи
3	3	6,4	10,57	14,94	5,5
5	4	16,84	20,28	56,52	14,96
7	3	1,69	4,24	6,36	1,88
9	1	1,9	9,36	6,29	2,14
11	2	0,69	2,64	0,91	0,8
13	2	1,36	4,74	1,16	1,82
15	1,5	1,18	4,09	0,28	2,12

По данным таблицы 4.8 были составлены сравнительные гистограммы гармонического состава, для каждой точки измерения напряжения в контактной сети. Гистограммы представлены на рисунках 4.29 – 4.32.

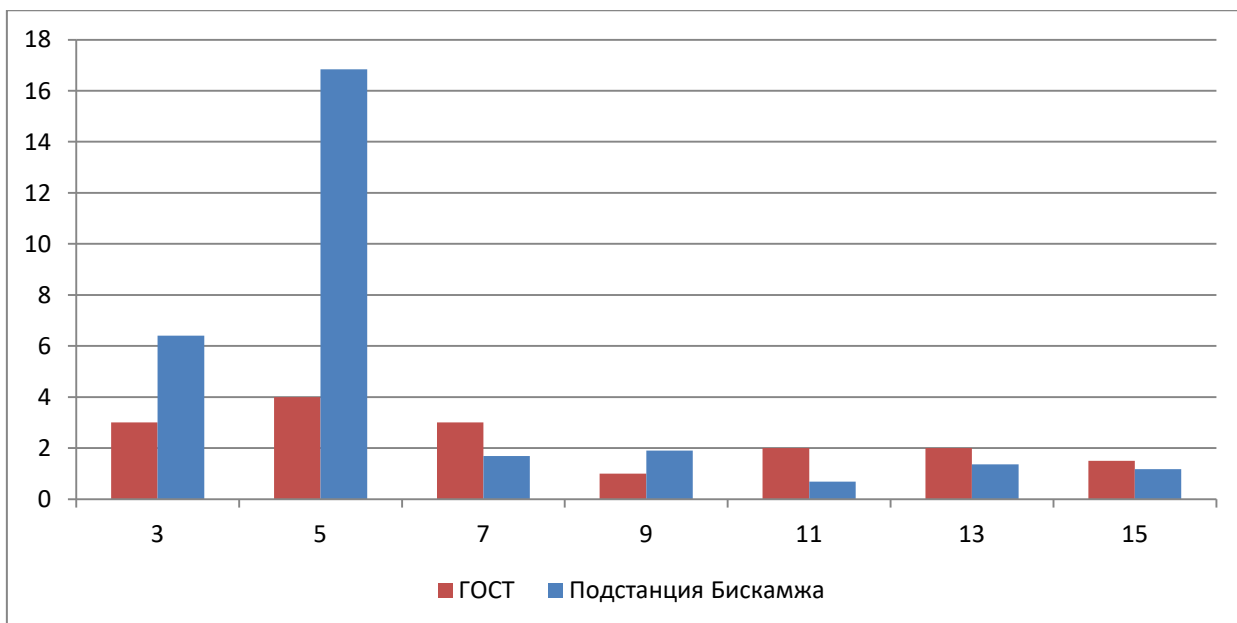


Рисунок 4.29 – Гармонический состав напряжения на шинах 27 кВ ТП Бискамжа

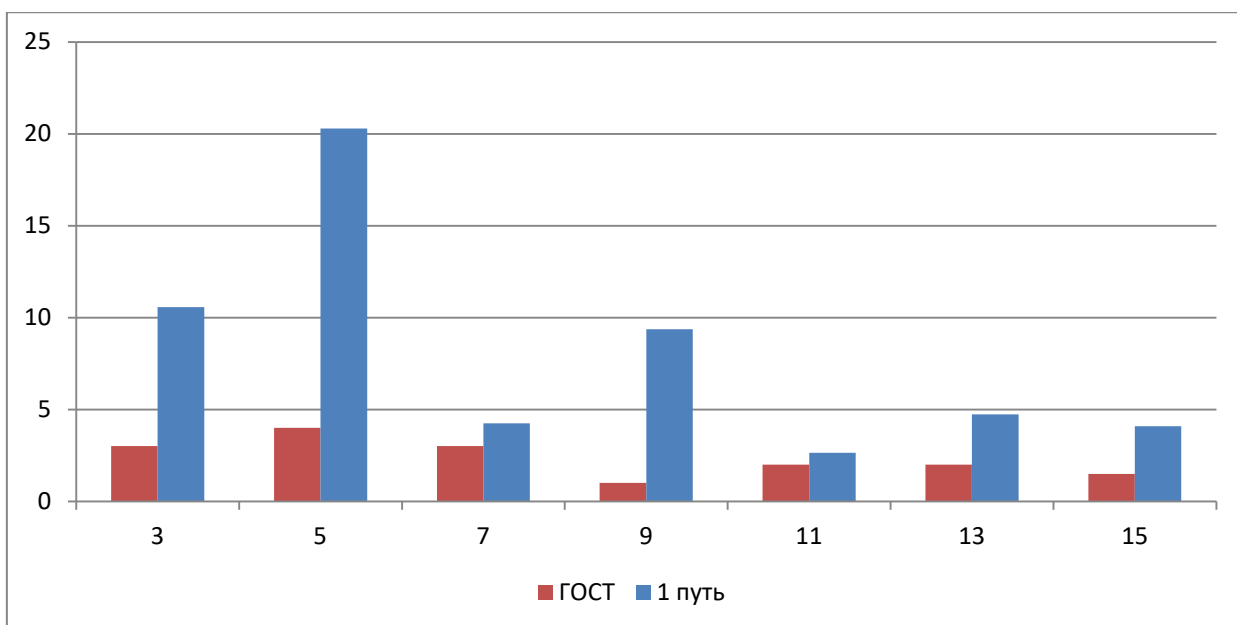


Рисунок 4.30 – Гармонический состав напряжения на первом пути Нанхчульского тоннеля

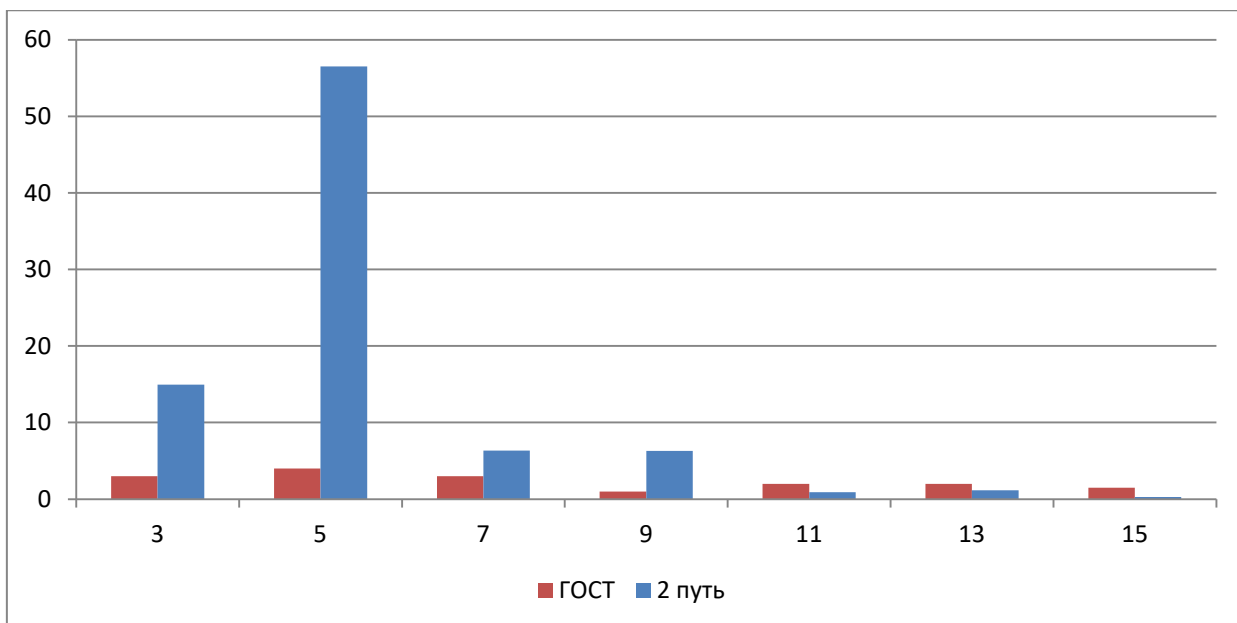


Рисунок 4.31 – Гармонический состав напряжения на втором пути
Нанхчульского тоннеля

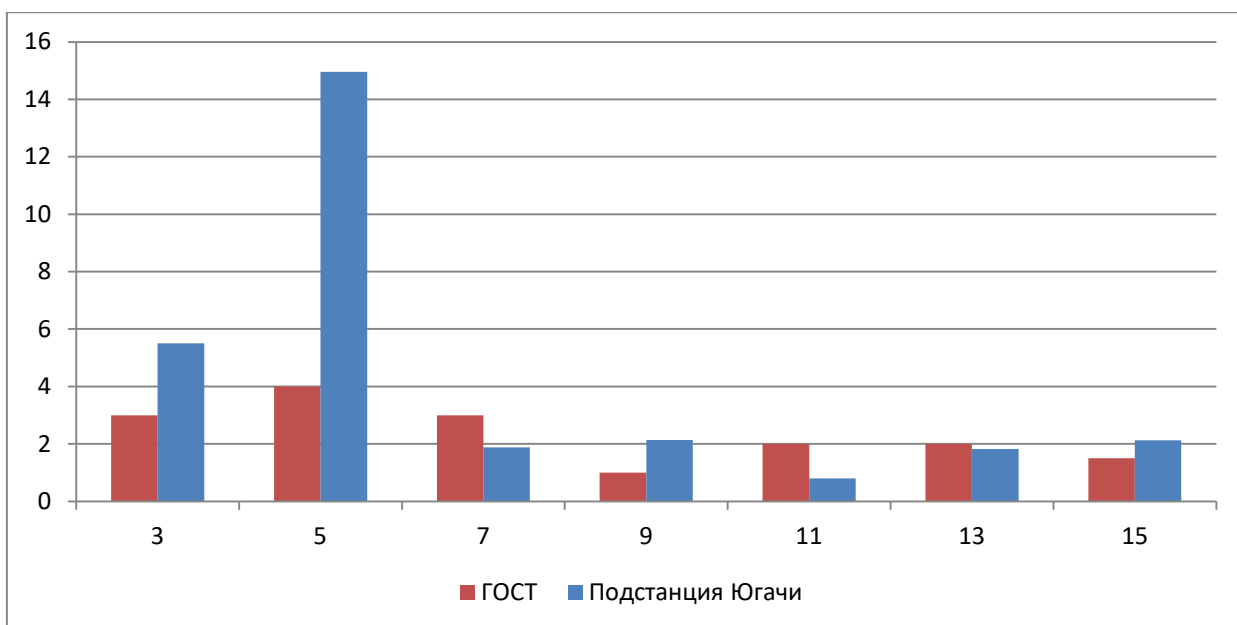


Рисунок 4.32 – Гармонический состав напряжения на ТП Югачи

На основании моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдаются провалы напряжения более 10% на зажимах тяговых трансформаторов ЭПС;
2. Из-за установки ППК на посту секционирования, искажение синусоиды значительно увеличивается;

3. На всех участках гармонический состав выходит за пределы ГОСТ;
4. В месте прохождения ЭПС, по путям Нанхчульского тоннеля, наблюдается 10-кратное превышение 5 гармоники от ГОСТ;
5. Установка ППК на посту секционирования не принесла положительных результатов, относительно случаев установки ПДК на посту секционирования и на ТП.

4.5 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги, при установке ФКУ на ТП Бискамжа и посту секционирования

Произведем моделирование контактной сети, при условии, что два ЭПС проходят по путям Нанхчульского тоннеля и один ЭПС проходит у ТП Югачи. В сети установлены ФКУ на ТП Бискамжа и на посту секционирования. В таблице 4.9 представлены величины напряжений в различных точках участка контактной сети, полученные в результате моделирования.

Таблица 4.9 – Напряжения в различных точках контактной сети, при прохождении трех электровозов, с установкой ППК на посту секционирования

Путь	Напряжение, о.е.					
	Бискамжа	в конце отсасывающей линии 1	до ЭПС	после ЭПС	в конце отсасывающей линии 2	Югачи
1	0,9216	1,008	–	0,9195	0,8991	0,9206
2	0,9216	0,9202	0,8953	0,9003	0,9321	0,9206

По данным таблицы 4.9 были построены гистограммы напряжений в разных точках КС, для обоих путей. Гистограммы представлены на рисунках 4.33 и 4.34.

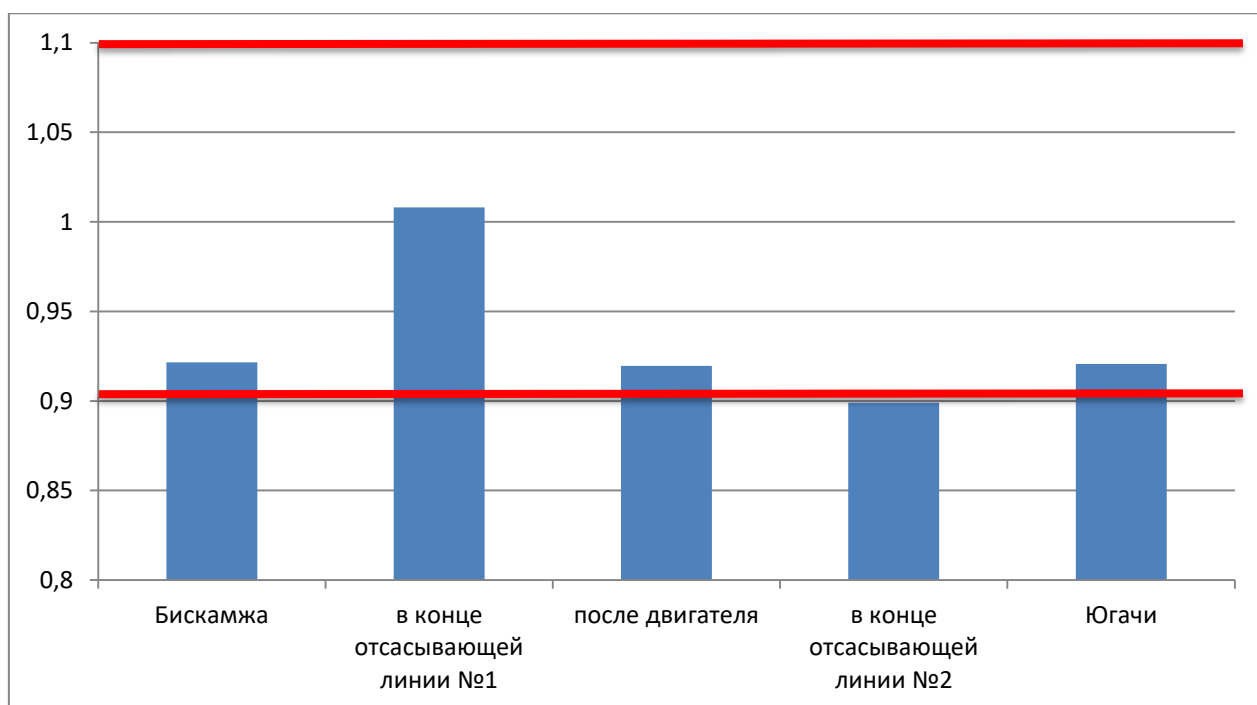


Рисунок 4.33 – Гистограмма напряжений на первом пути

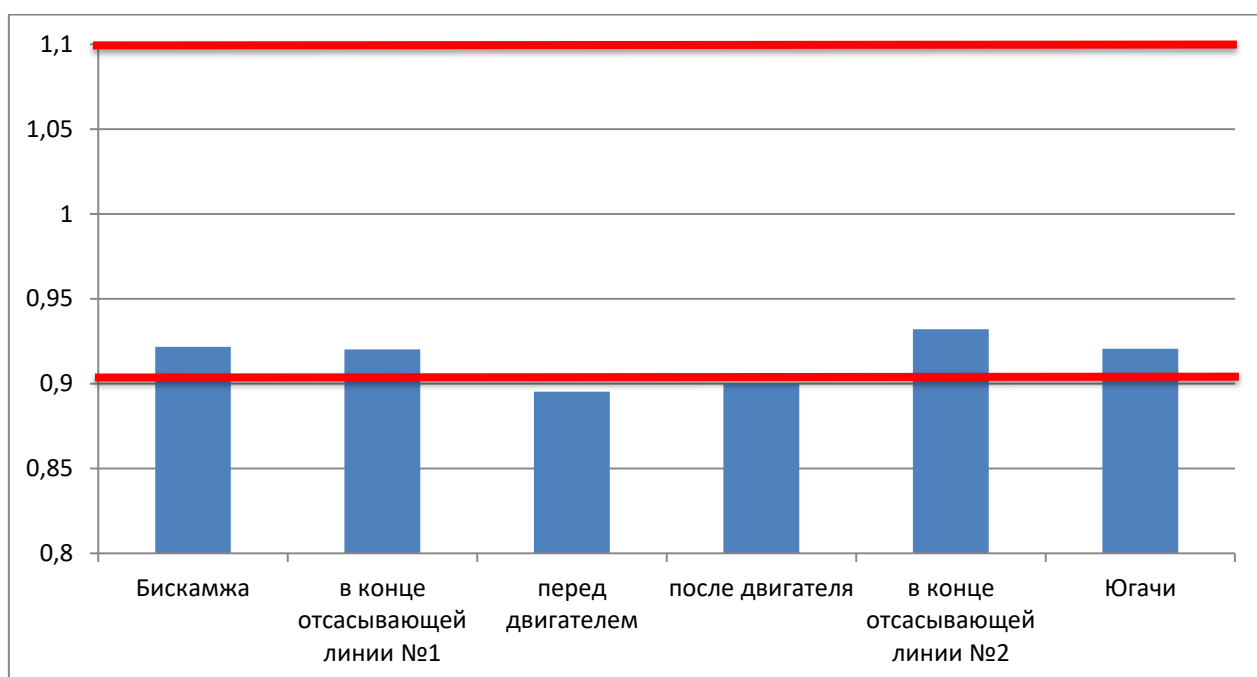


Рисунок 4.34 – Гистограмма напряжений на втором пути

На рисунках 4.35 – 4.36 представлены осциллограммы напряжения, построенные по результатам моделирования.

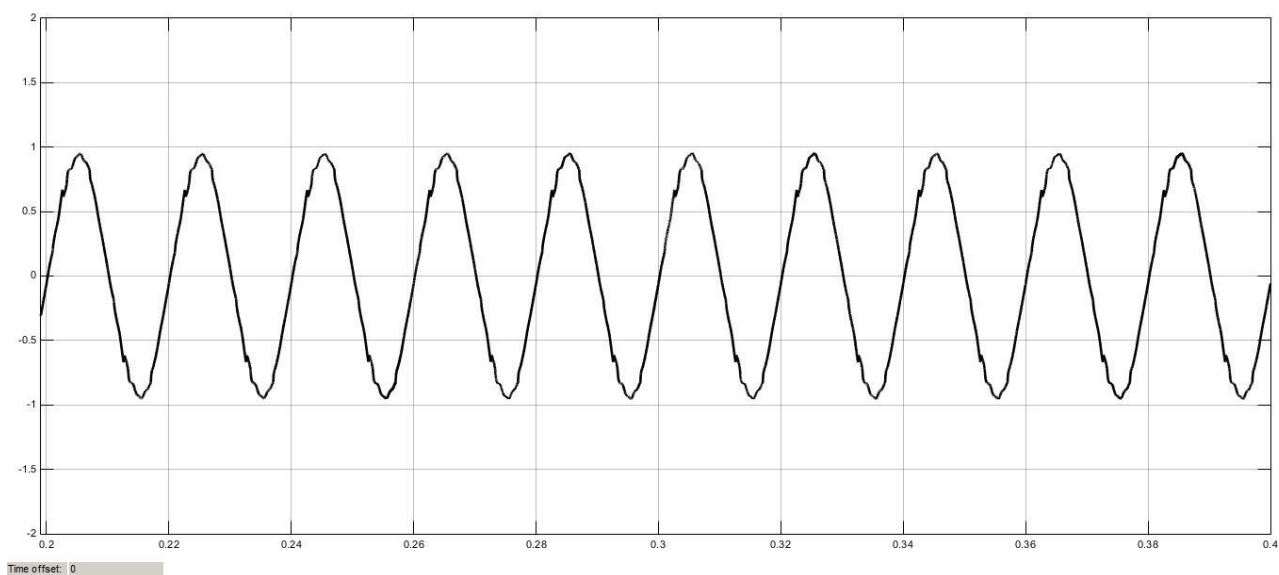


Рисунок 4.35 – Осциллограмма напряжения на шинах 27кВ ТП Бискамжа

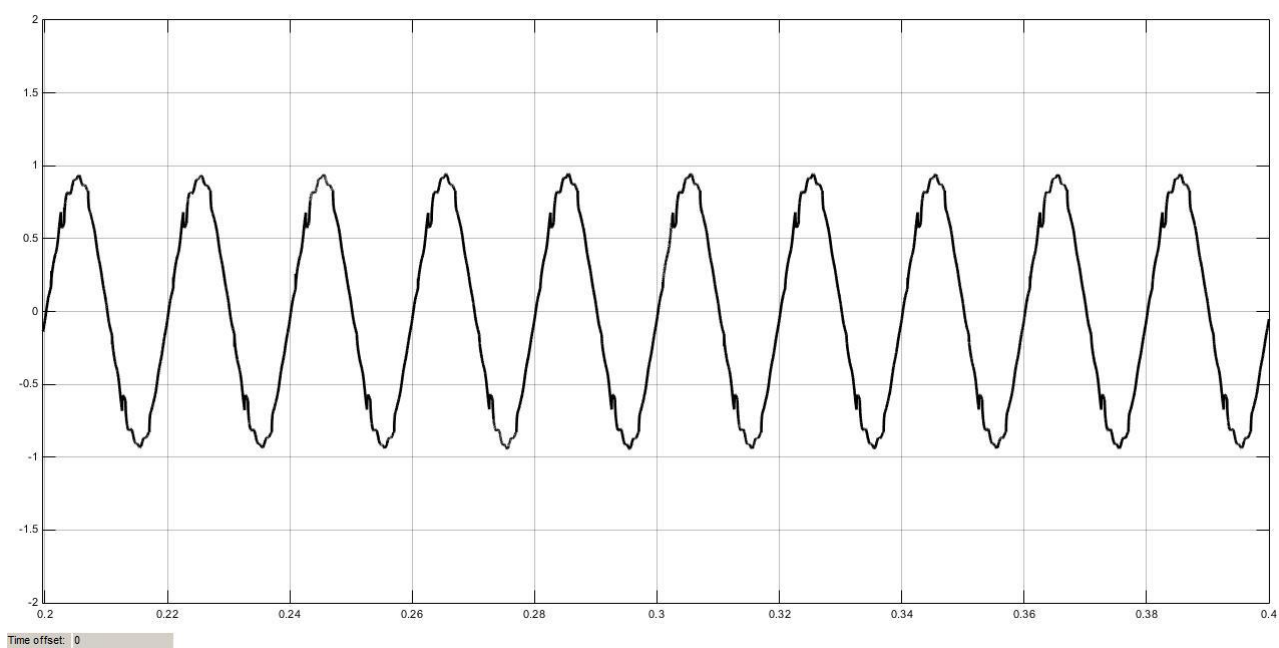


Рисунок 4.36 – Осциллограмма напряжения в месте прохождения ЭПС

В соответствии с результатами гармонического анализа осциллограмм напряжения на шинах 27 кВ тяговых подстанций и в местах прохождения электровозов, была составлена таблица 4.10.

Таблица 4.10 – Гармонический состав напряжения

№ гармоники	ГОСТ, %	Процентное содержание гармоник			
		ТП Бискамжа	1 путь	2 путь	ТП Югачи
3	3	2,38	7,67	3,02	2,93
5	4	0,99	9,04	1,2	3,27
7	3	0,29	4,61	0,37	1,76
9	1	0,32	7,97	0,61	3,2
11	2	0,36	2,07	0,55	0,95
13	2	1	4,83	1,7	2,55
15	1,5	0,89	4,35	1,29	2,77

По данным таблицы 4.10 были составлены сравнительные гистограммы гармонического состава, для каждой точки измерения напряжения в контактной сети. Гистограммы представлены на рисунках 4.37 – 4.40.

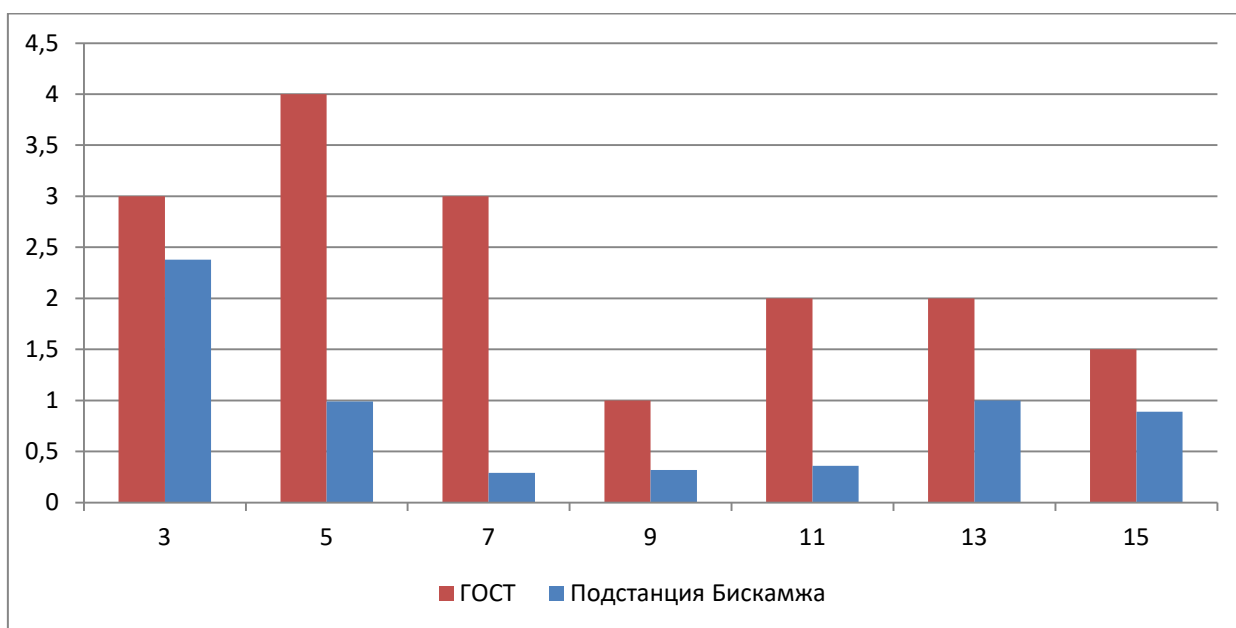


Рисунок 4.37 – Гармонический состав напряжения на шинах 27 кВ ТП Бискамжа

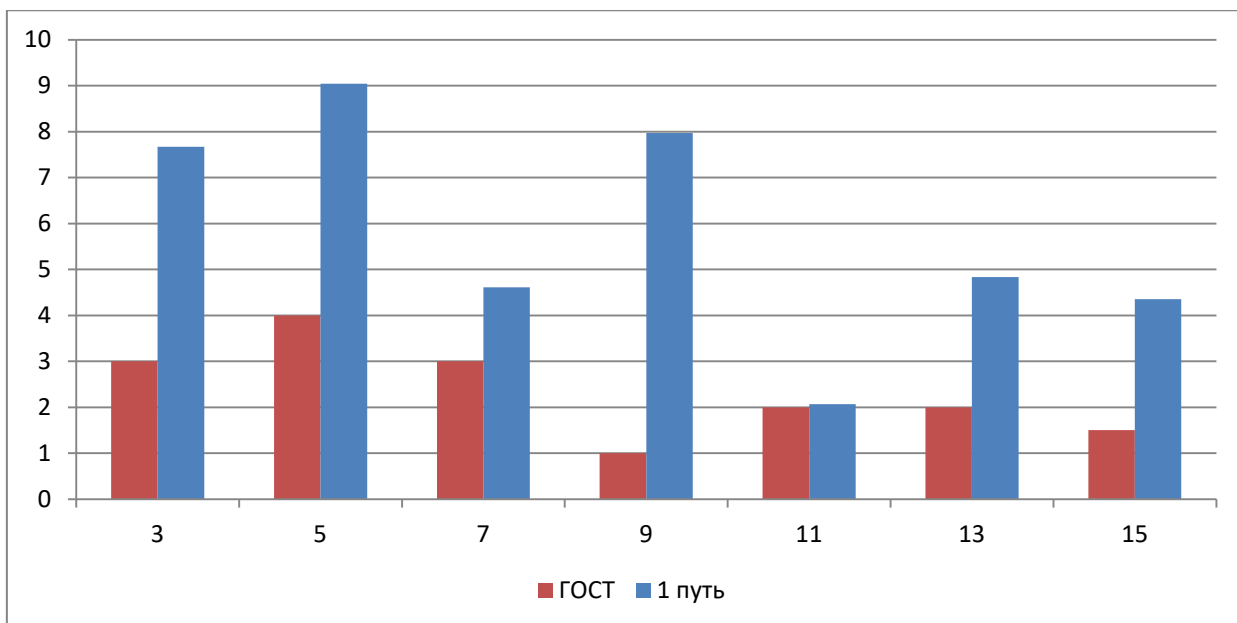


Рисунок 4.38 – Гармонический состав напряжения на первом пути
Нанхчульского тоннеля

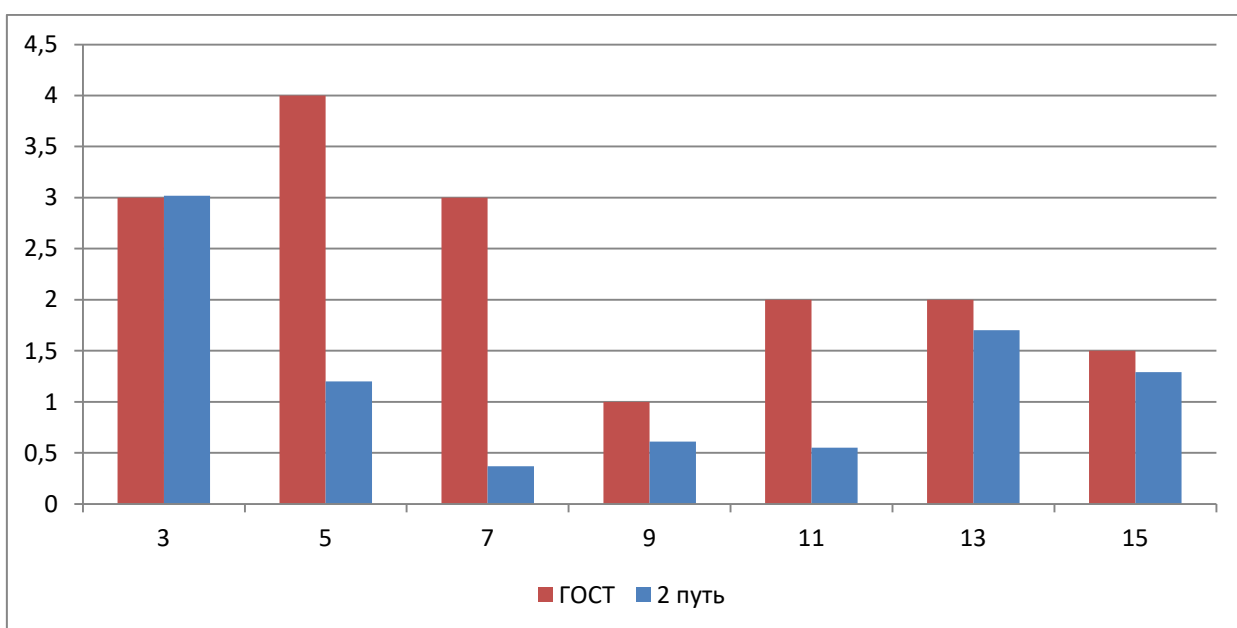


Рисунок 4.39 – Гармонический состав напряжения на втором пути
Нанхчульского тоннеля

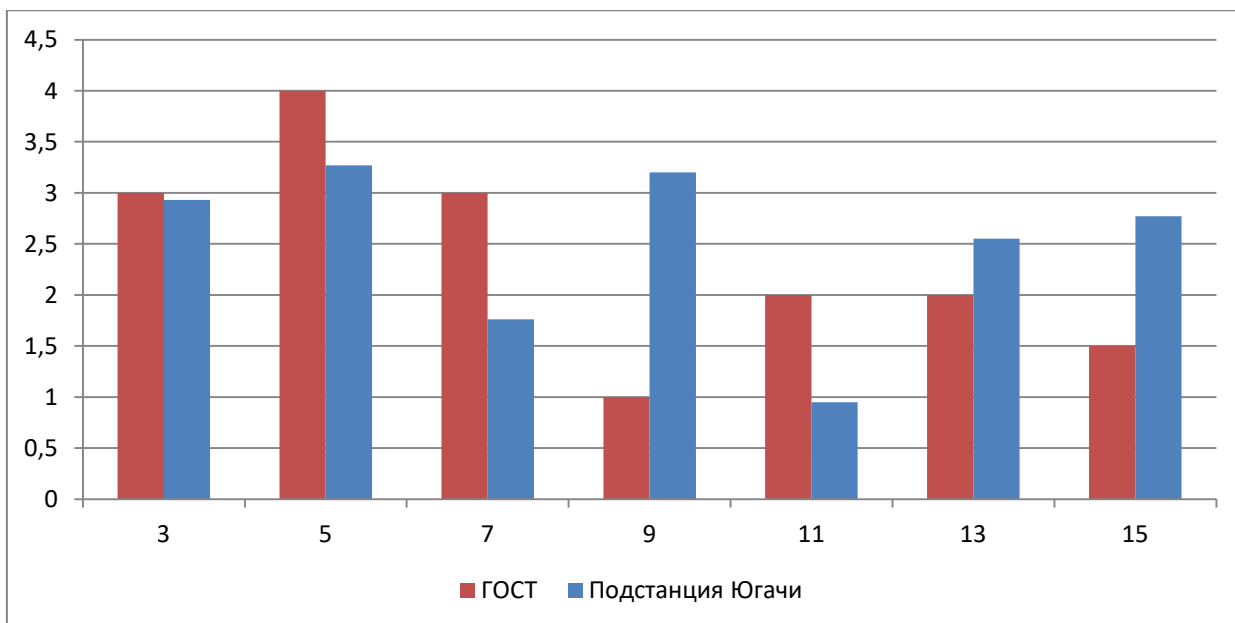


Рисунок 4.40 – Гармонический состав напряжения на ТП Югачи

На основании моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Провалы напряжения не более 10% на всем протяжении контактной сети;
2. На первом пути Нанхчульского тоннеля, при прохождении ЭПС, гармонический состав выходит за пределы ГОСТ;
3. В местах установки ФКУ гармонический состав не выходит за пределы ГОСТ.
4. Кривая напряжения имеет более ровный синусоидальный характер, нежели в других случаях.

При использовании ФКУ в контактной сети уменьшаются просадки напряжения, улучшается гармонический состав и кривая напряжения принимает практически синусоидальный вид.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы, было выполнено моделирование системы тяговой сети участка Камышта – Бискамба Красноярской железной дороги. Модель была выполнена при помощи системы MATLAB пакета Simulink и его библиотеки элементов SimPowerSystems.

Процесс создания модели тяговой сети электроснабжения был разбит на несколько этапов, с целью отладки каждого элемента математическо-графической модели сети. Это позволило добиться предельно приближенных к реальности результатам.

Моделирование показало, что наиболее лучшими показателями обладает контактная сеть, в которой установлены ФКУ. Они продемонстрировали уменьшение просадок напряжения, улучшение гармонического состава и кривой напряжения, за счет частичной фильтрации некоторых основных гармоник.

Необходимость в качественном напряжении объясняется тем, что потребитель в контактной сети, т.е. ЭПС, имеет нелинейный, однофазный характер.

Улучшение качества электроэнергии позволит тяговым потребителям работать с наименьшими потерями и в бесперебойном режиме.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ТП – тяговая подстанция;
ЭПС – электроподвижный состав;
ПЛ – питающая линия;
КС – контактная сеть;
ОЛ – отсасывающая линия;
НВ – нейтральная вставка;
НП – нетяговый потребитель;
ИС – изолирующее сопряжение;
ДПР – система два провода – рельс;
СЦБ – сигнализация, централизация и блокировка;
ППК – поперечная компенсация;
ПДК – продольная компенсация;
ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Железнодорожный справочник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://вики.жд.рф/wiki/ЖД_@_РФ
2. Бей, Ю. М. Тяговые подстанции [Текст] : учебник для вузов ж.д. транспорта / Бей Ю. М., Мамошин Р. Р., Пупынин В. Н., Шалимов М. Г. – М. : Транспорт, 1989 – 319 с.
3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 03.04.2012 N 651р. Об утверждении и вводе в действие документа «Устройства и элементы рельсовых линий и тяговой рельсовой сети. Технические требования и нормы содержания» [текст].
4. Пантелев, В. И. ЭМС для технических систем, электрических сетей, систем электроснабжения рельсового транспорта, подземных коммуникаций: учеб. пособие в 3 частях. Ч .1. Электромагнитное влияние / В. И. Пантелев, В. Н. Яковлев. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 302с.
5. Хорошилов, Н. В. Электропитающие системы и электрические сети [Текст]: учебное пособие / Хорошилов Н.В., Пилюгин А.В., Хорошилова Л.В., Бирюлин В.И., Ларин О.М. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2016. – 352 с.
6. Общие методы выбора параметров и оценки эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности в тяговой сети переменного тока [Текст] / Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). – Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 15 – 17 сентября 2015 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава. – Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 27 – 30 октября 2015 г., Комитет ОСЖД, г.Варшава – 30 октября 2015 г. – 13 с.
7. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К Г Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1982 – 527 с.

8. Марквардт, К.Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. Том.1. [Текст]:/ Под ред. Марквардт К.Г. – М. : Транспорт, 1980 – 256 с.
9. Герасименко, А. А, Федин, В.Т. Передача и распределение электрической энергии [Текст] : учеб. пособие. / Герасименко А.А, Федин В.Т. – Ростов н/Д : Феникс, 2006. - 720 с, ил.
10. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] : учебник / Л.А. Бессонов. – 12-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2010. – 637 с., ил.
11. Грищенко, А. В. Моделирование влияния электропривода тяги на систему электроснабжения / А. В. Грищенко, А.В. Коловский // Современные проблемы развития фундаментальных и прикладных наук : материалы IV Междунар. научн.-практ. конф., Т. 2. – Прага: Printing house «Maestro», 2016. – С. 42-45.
12. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст]: учебное пособие / Герман - Галкин С.Г – СПб: КОРОНА принт, 2001 – 320с., ил.
13. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И.В. Жежеленко. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
14. Кочетков, В.П. Основы электромеханики [Текст]: учебное пособие / В.П. Кочетков, В.Я. Беспалов, Е.Я. Глушкин ; Сибирский федеральный университет. - Красноярск : СФУ, 2010. – 624 с.
15. Аррилага, Дж., Брэдли, Д., Боджер, Д. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, Д. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.: ил.
16. Мещеряков, В.Н. Активные фильтрокомпенсирующие устройства для систем регулируемого электропривода постоянного тока. [Текст]: монография/ В.Н. Мещеряков, А.А. Коваль. – Липецк, 2008. – 164 с.
17. Шапиро, И.М., Рокотян, С.С. Справочник по проектированию электроэнергетических систем [Текст] / В. В. Ершевич, А. Н. Зейлигер, Г. А.

Илларионов и др.: Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с., ил.

18. Якимов, Г.Б. Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий [Текст]: справочник / под ред. Якимова Г.Б. – М.: «ТРАНСИЗДАТ», 2001 – 512 с.

19. Герман-Галкин, С.Г., Кардонов, Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК [Текст]: учебное пособие / Герман - Галкин С.Г., Кардонов Г.А. – СПб: КОРОНА принт, 2003 – 256с., ил.

20. Черных, И.В. Моделирование электро-технических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. -М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

21. Карташев, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / под ред. М.А. Калугиной. М.: Издательство МЭИ, 2000. - 120 с.

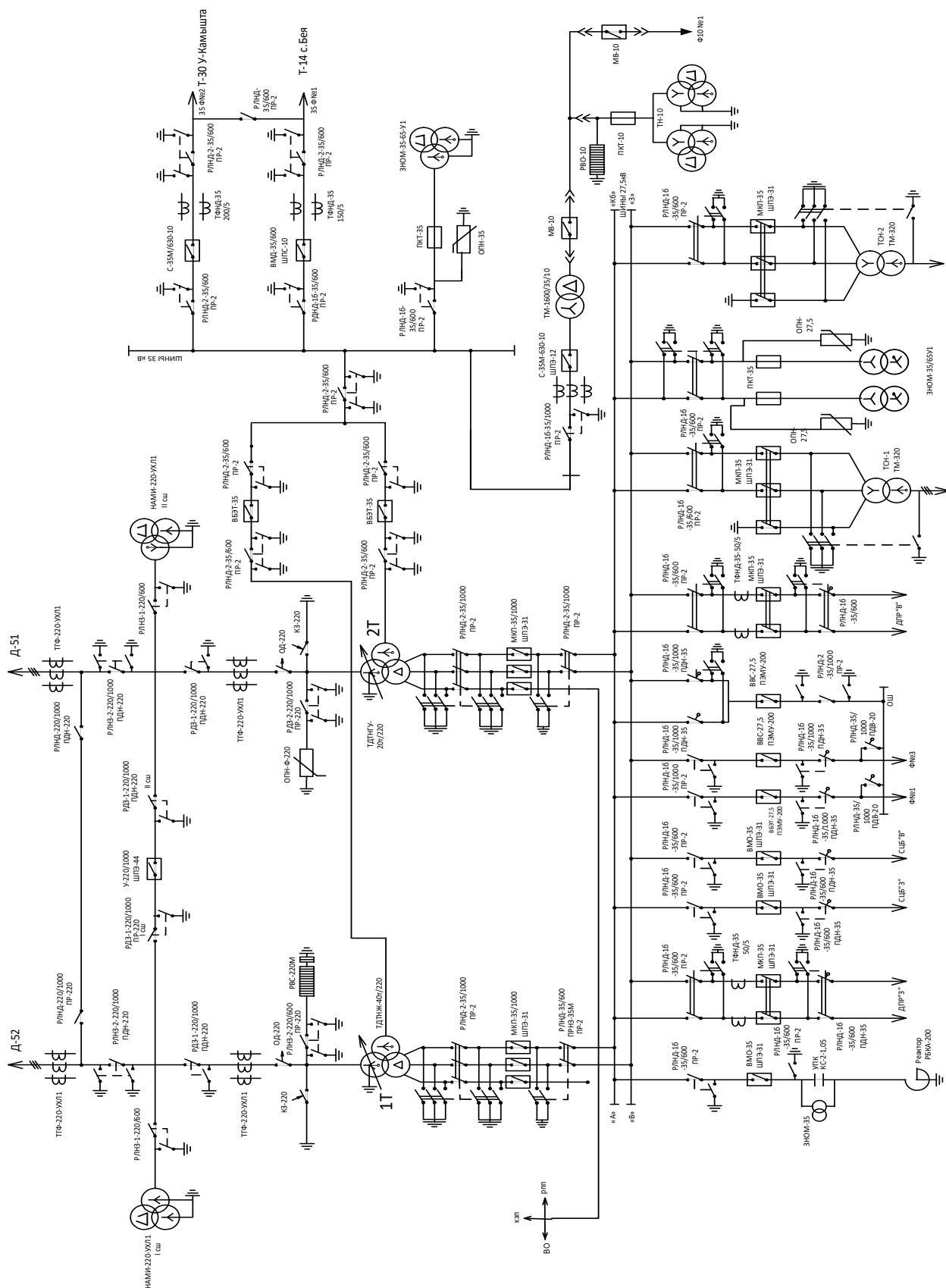
22. Электрические схемы электровоза 2ЭС5К «ЕРМАК» / ВСЖД. – Улан-Удэ. – 47 с.

23. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – введ. 1.07.2014 г. – М.: Стандартинформ, 2009. – 15 с.

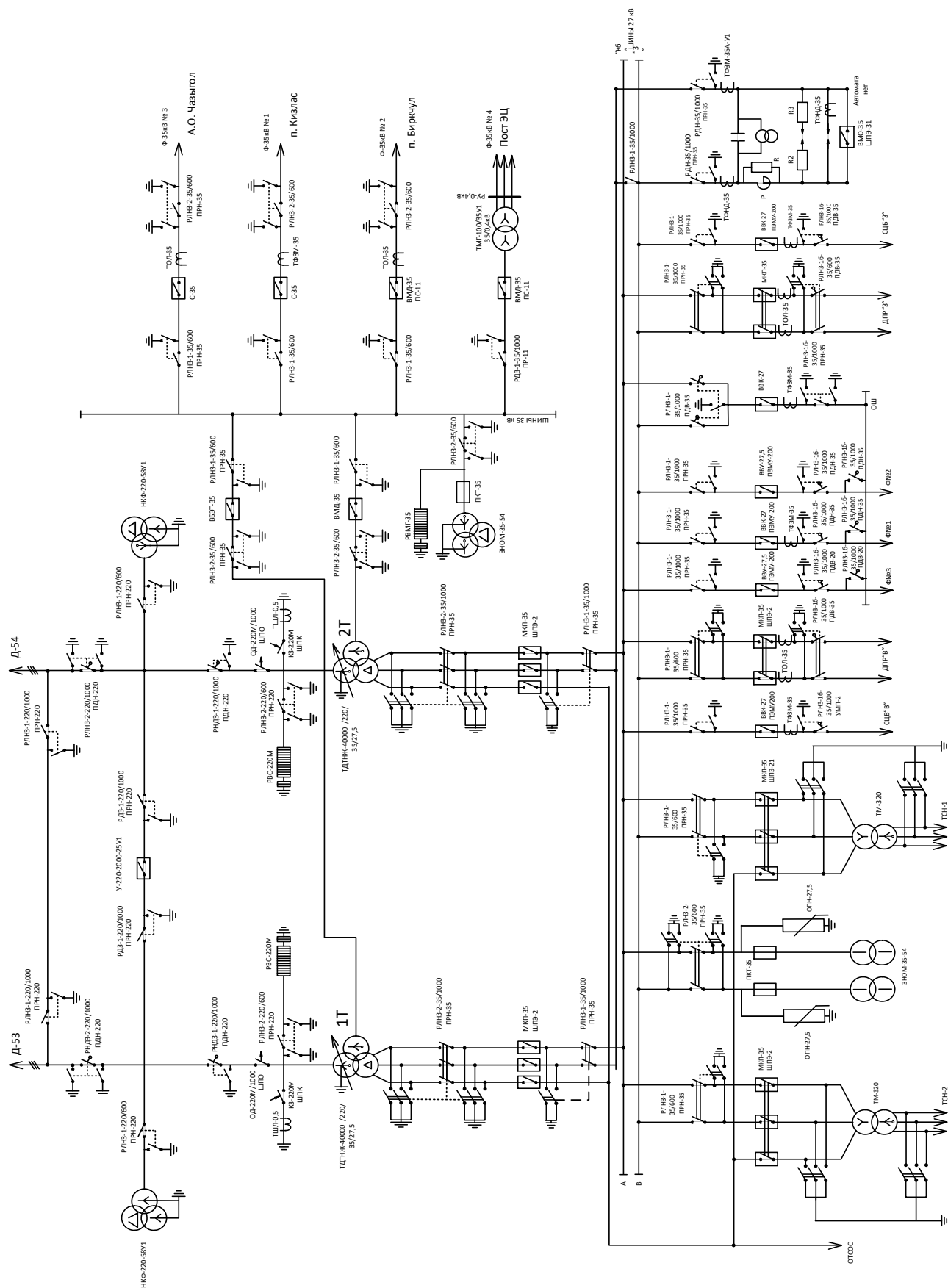
24. Климов, В.П. Москалев, А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания. Режим доступа: ТЭНСИ ПЛЮС <http://www.tensy.ru/article01.html>.

25. Давыдов, Ю.А. Тяговые электрические машины : учеб. пособие / Ю.А. Давыдов, А.К. Пляскин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – 126 с., ил.

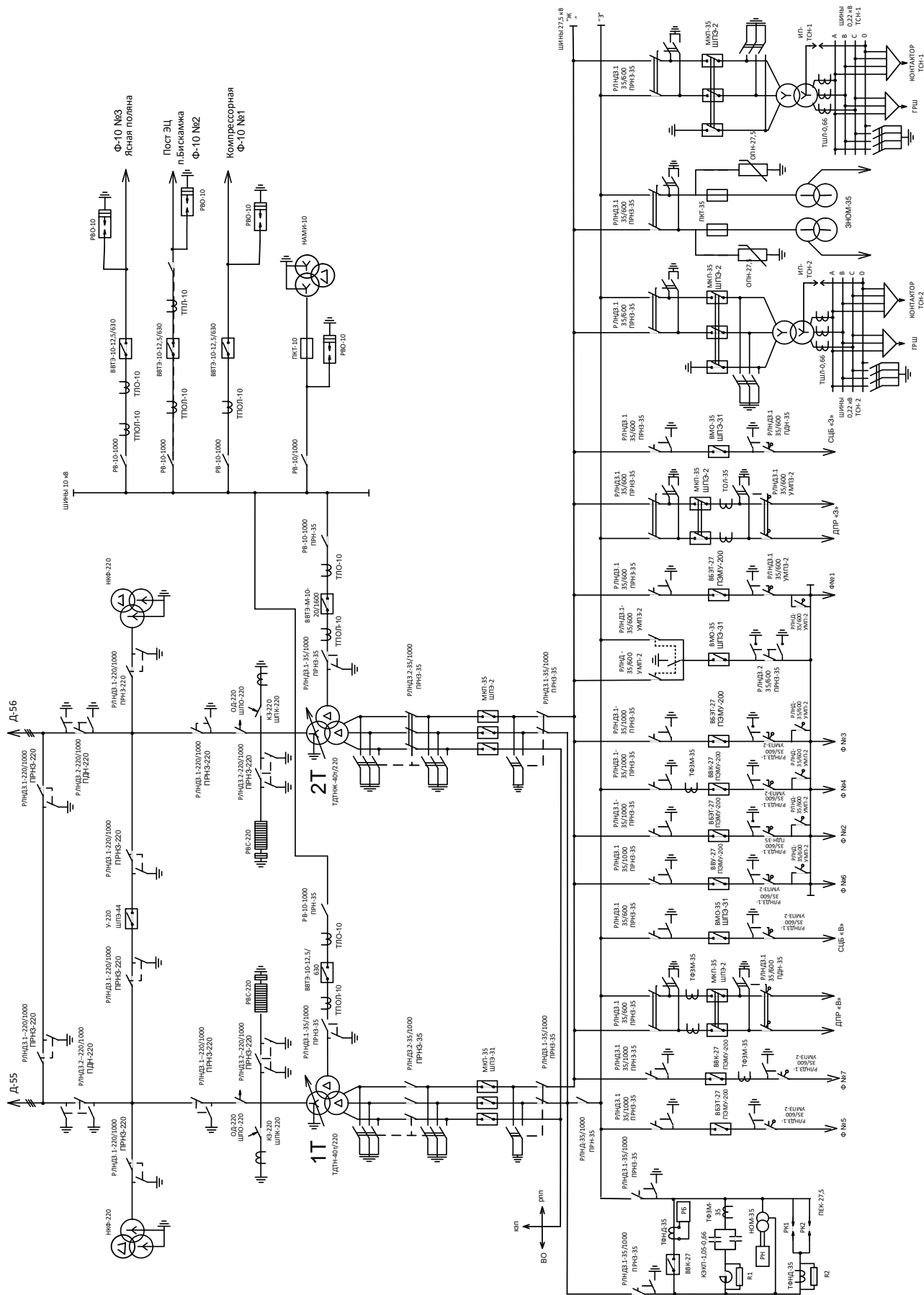
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Однолинейная схема тяговой подстанции Камышта



ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Однолинейная схема тяговой подстанции Югачи



ПРИЛОЖЕНИЕ В. Однолинейная схема тяговой подстанции Бискамжа



ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Алгоритм расчета параметров линий контактной сети, представленный в М-файле системы MATLAB

```
% Рельсовая цепь
Lks=2;
R0res=0.147;
Rres=R0res*Lks;
X0=0.4;
Xks=X0*Lks;
Q0ks=(27.5e3)^2*2.8e-6*Lks/6; %половина зарядной мощности

% ДПР Бискамжа - Югачи
Rdpr0=0.244;
Ldpr=4.2+6.9+2.5+0.5+10.2+0.5+8.1+0.5+10.3;
X0=0.4;
Xdpr=X0*Ldpr;
Rdpr=Rdpr0*Ldpr;

% Отсасывающая линия фидер от Бискамжи до Ф51
R0ol_1=0.17;
Lol_1=2.7;
X0ol_1=0.4;
Rol_1=R0ol_1*Lol_1;
Xol_1=X0ol_1*Lol_1;

% Отсасывающая линия Фидер от Ф11 до Ст. Югачи
R0ol_3=0.17;
Lol_3=10.3;
X0ol_3=0.4;
Rol_3=R0ol_3*Lol_3;
Xol_3=X0ol_3*Lol_3;

% Отсасывающая линия фидер от Бискамжи до Ф62
R0ol_2=0.17;
Lol_2=2.7;
X0ol_2=0.4;
Rol_2=R0ol_2*Lol_2;
Xol_2=X0ol_2*Lol_2;

% Отсасывающая линия Фидер от Ф21 до Ст. Югачи
R0ol_4=0.17;
Lol_4=3.1;
X0ol_4=0.4;
Rol_4=R0ol_4*Lol_4;
Xol_4=X0ol_4*Lol_4;

% Контактная сеть Бискамжа - Югачи (верх. линия)
R0bf51=0.17;
Lbf51=2.7;
X0=0.4;
Xbf51=X0*Lbf51;
```

$R_{bf51} = R_{0bf51} * L_{bf51}$; %фидер от Бискамжи до Ф51

$R_{0f51A_1} = 0.48$;

$R_{0f51A_2} = 0.185$;

$R_{0f51A_3} = 0.17$;

$L_{f51A} = 4.2$;

$X_0 = 0.4$;

$X_{f51A} = X_0 * L_{f51A}$;

$R_{f51A_1} = R_{0f51A_1} * L_{f51A}$;

$R_{f51A_2} = R_{0f51A_2} * L_{f51A}$;

$R_{f51A_3} = R_{0f51A_3} * L_{f51A}$; %От Ф51 –до воздушного промежутка А

$R_{0AI1_1} = 0.48$;

$R_{0AI1_2} = 0.185$;

$R_{0AI1_3} = 0.17$;

$L_{AI1} = 6.9$;

$X_0 = 0.4$;

$X_{AI1} = X_0 * L_{AI1}$;

$R_{AI1_1} = R_{0AI1_1} * L_{AI1}$;

$R_{AI1_2} = R_{0AI1_2} * L_{AI1}$;

$R_{AI1_3} = R_{0AI1_3} * L_{AI1}$; %От воздушного промежутка А - до воздушного промежутка И-1

$R_{0nt_11} = 0.48$;

$R_{0nt_21} = 0.185/2$;

$L_{nt_11} = 2.41$;

$X_0 = 0.4$;

$X_{nt_11} = X_0 * L_{nt_11}$;

$R_{nt_11} = R_{0nt_11} * L_{nt_11}$;

$R_{nt_21} = R_{0nt_21} * L_{nt_11}$; %нанхчульский тоннель

$R_{0nch_11} = 0.48$;

$R_{0nch_21} = 0.185$;

$L_{nch_11} = 0.5$;

$X_0 = 0.4$;

$X_{nch_11} = X_0 * L_{nch_11}$;

$R_{nch_11} = R_{0nch_11} * L_{nch_11}$;

$R_{nch_21} = R_{0nch_21} * L_{nch_11}$; %станция нанхчул

$R_{0BA_1} = 0.158$;

$R_{0BA_2} = 0.185$;

$R_{0BA_3} = 0.17$;

$L_{BA} = 10.2$;

$X_0 = 0.4$;

$X_{BA} = X_0 * L_{BA}$;

$R_{BA_1} = R_{0BA_1} * L_{BA}$;

$R_{BA_2} = R_{0BA_2} * L_{BA}$;

$R_{BA_3} = R_{0BA_3} * L_{BA}$; %От воздушного промежутка В - до воздушного промежутка А
(нанчхул - хабзас)

$R_{0xz_11} = 0.158$;

$R_{0xz_21} = 0.185$;

$L_{xz_11} = 0.5$;

$X0=0.4;$
 $X_{xz_11}=X0*L_{xz_11};$
 $R_{xz_11}=R0_{xz_11}*L_{xz_11};$
 $R_{xz_21}=R0_{xz_21}*L_{xz_11};$ %станция хазбас

$R0BA2_1=0.17;$
 $R0BA2_2=0.158;$
 $R0BA2_3=0.185;$
 $LBA2=8.1;$
 $X0=0.4;$
 $XBA2=X0*LBA2;$
 $RBA2_1=R0BA2_1*LBA2;$
 $RBA2_2=R0BA2_2*LBA2;$
 $RBA2_3=R0BA2_3*LBA2;$ %от хазбаса до биркчуль

$R0br_11=0.158;$
 $R0br_21=0.185;$
 $Lbr_11=0.5;$
 $X0=0.4;$
 $Xbr_11=X0*Lbr_11;$
 $Rbr_11=R0br_11*Lbr_11;$
 $Rbr_21=R0br_21*Lbr_11;$ %станция биркчул

$R0f11Y=0.17;$
 $Lf11Y=10.3;$
 $X0=0.4;$
 $Xf11Y=X0*Lf11Y;$
 $Rf11Y=R0f11Y*Lf11Y;$ %Фидер от Ф11 до Ст. Югачи

% Контактная сеть Бискамжа - Югачи (нижняя.линия)

$R0bf62=0.17;$
 $Lbf62=2.7;$ % длина указана 1.3 км, но по схеме видно, что длина такая же, как и верхняя линия - оставил пока так
 $X0=0.4;$
 $Xbf62=X0*Lbf62;$
 $Rbf62=R0bf62*Lbf62;$ %фидер от Бискамжи до Ф62

$R0f62H2_1=0.158;$
 $R0f62H2_2=0.185;$
 $R0f62H2_3=0.17;$
 $Lf62H2=7;$
 $X0=0.4;$
 $Xf62H2=X0*Lf62H2;$
 $Rf62H2_1=R0f62H2_1*Lf62H2;$
 $Rf62H2_2=R0f62H2_2*Lf62H2;$
 $Rf62H2_3=R0f62H2_3*Lf62H2;$ %От Ф62 – до вставки H2

$R0H2H4_1=0.158;$
 $R0H2H4_2=0.185;$
 $LH2H4=0.3;$
 $X0=0.4;$

$XH2H4 = X0 * LH2H4;$
 $RH2H4_1 = R0H2H4_1 * LH2H4;$
 $RH2H4_2 = R0H2H4_2 * LH2H4;$ %От вставки Н2 до Н4

$R0H4I2_1 = 0.622;$
 $R0H4I2_2 = 0.185;$
 $R0H4I2_3 = 0.17;$
 $LH4I2 = 6.9;$
 $X0 = 0.4;$
 $XH4I2 = X0 * LH4I2;$
 $RH4I2_1 = R0H4I2_1 * LH4I2;$
 $RH4I2_2 = R0H4I2_2 * LH4I2;$
 $RH4I2_3 = R0H4I2_3 * LH4I2;$ %От вставки Н4 до И2

$R0nt_12 = 0.48;$
 $R0nt_22 = 0.185/2;$
 $Lnt_22 = 2.41;$
 $X0 = 0.4;$
 $Xnt_12 = X0 * Lnt_22;$
 $Rnt_12 = R0nt_12 * Lnt_22;$
 $Rnt_22 = R0nt_22 * Lnt_22;$ %нанхчульский тоннель

$R0nch_12 = 0.48;$
 $R0nch_22 = 0.185;$
 $Lnch_22 = 0.5;$
 $X0 = 0.4;$
 $Xnch_12 = X0 * Lnch_22;$
 $Rnch_12 = R0nch_12 * Lnch_22;$
 $Rnch_22 = R0nch_22 * Lnch_22;$ %станция нанхчул

$R0gb_1 = 0.622;$
 $R0gb_2 = 0.185;$
 $Lgb = 10.2;$
 $X0 = 0.4;$
 $Xgb = X0 * Lgb;$
 $Rgb_1 = R0gb_1 * Lgb;$
 $Rgb_2 = R0gb_2 * Lgb;$ %От вставки Г до Б (нанчхул - хабзас)

$R0xz_12 = 0.622;$
 $R0xz_22 = 0.185;$
 $Lxz_22 = 0.5;$
 $X0 = 0.4;$
 $Xxz_12 = X0 * Lxz_22;$
 $Rxz_12 = R0xz_12 * Lxz_22;$
 $Rxz_22 = R0xz_22 * Lxz_22;$ %станция хазбас

$R0gb2_1 = 0.622;$
 $R0gb2_2 = 0.185;$
 $R0gb2_3 = 0.17;$
 $Lgb2 = 8.1;$
 $X0 = 0.4;$
 $Xgb2 = X0 * Lgb2;$

$R_{gb2_1} = R_{0gb2_1} * L_{gb2}$;
 $R_{gb2_2} = R_{0gb2_2} * L_{gb2}$;
 $R_{gb2_3} = R_{0gb2_3} * L_{gb2}$; %от хазбаса до биркчуль

$R_{0br_12} = 0.622$;
 $R_{0br_22} = 0.185$;
 $L_{br_22} = 0.5$;
 $X_0 = 0.4$;
 $X_{br_12} = X_0 * L_{br_22}$;
 $R_{br_12} = R_{0br_12} * L_{br_22}$;
 $R_{br_22} = R_{0br_22} * L_{br_22}$; %станция биркчул

$R_{0BA3_1} = 0.622$;
 $R_{0BA3_2} = 0.185$;
 $R_{0BA3_3} = 0.17$;
 $L_{BA3} = 7$;
 $X_0 = 0.4$;
 $X_{BA3} = X_0 * L_{BA3}$;
 $R_{BA3_1} = R_{0BA3_1} * L_{BA3}$;
 $R_{BA3_2} = R_{0BA3_2} * L_{BA3}$;
 $R_{BA3_3} = R_{0BA3_3} * L_{BA3}$; %от вставки В до А (биркчул - югачи)

$R_{0f21Y} = 0.17$;
 $L_{f21Y} = 3.1$;
 $X_0 = 0.4$;
 $X_{f21Y} = X_0 * L_{f21Y}$;
 $R_{f21Y} = R_{0f21Y} * L_{f21Y}$; %Фидер от Ф21 до Ст. Югачи